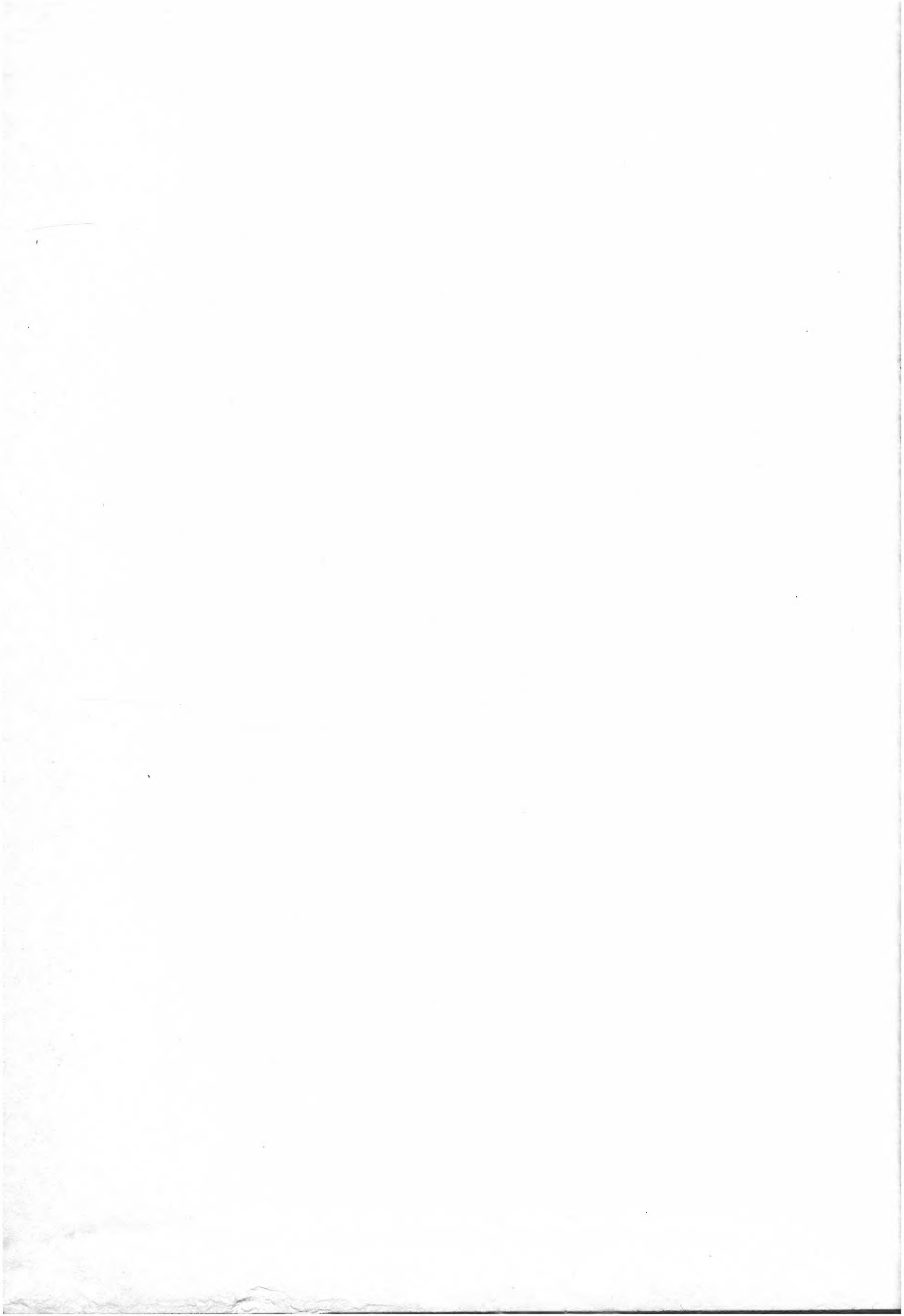
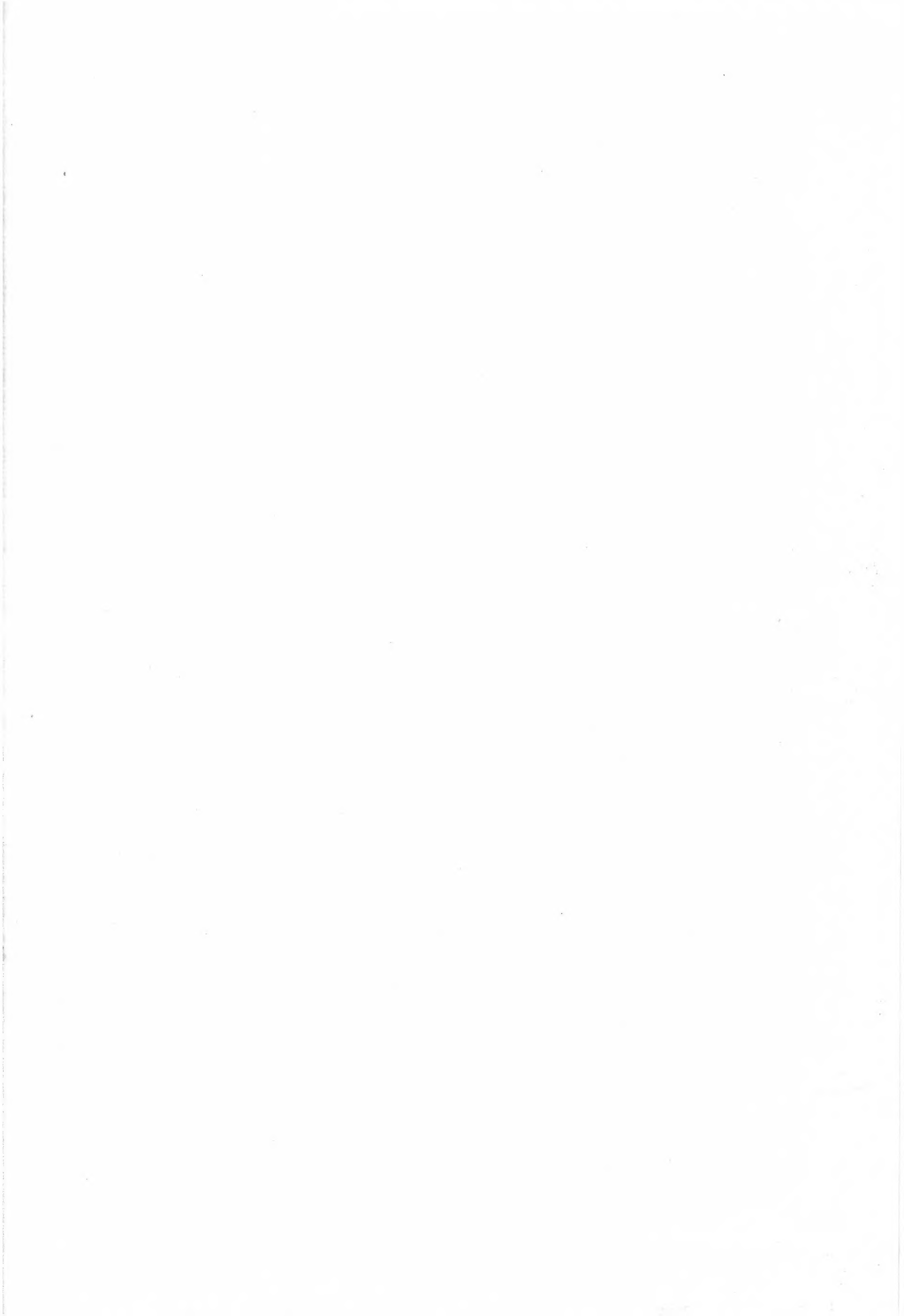
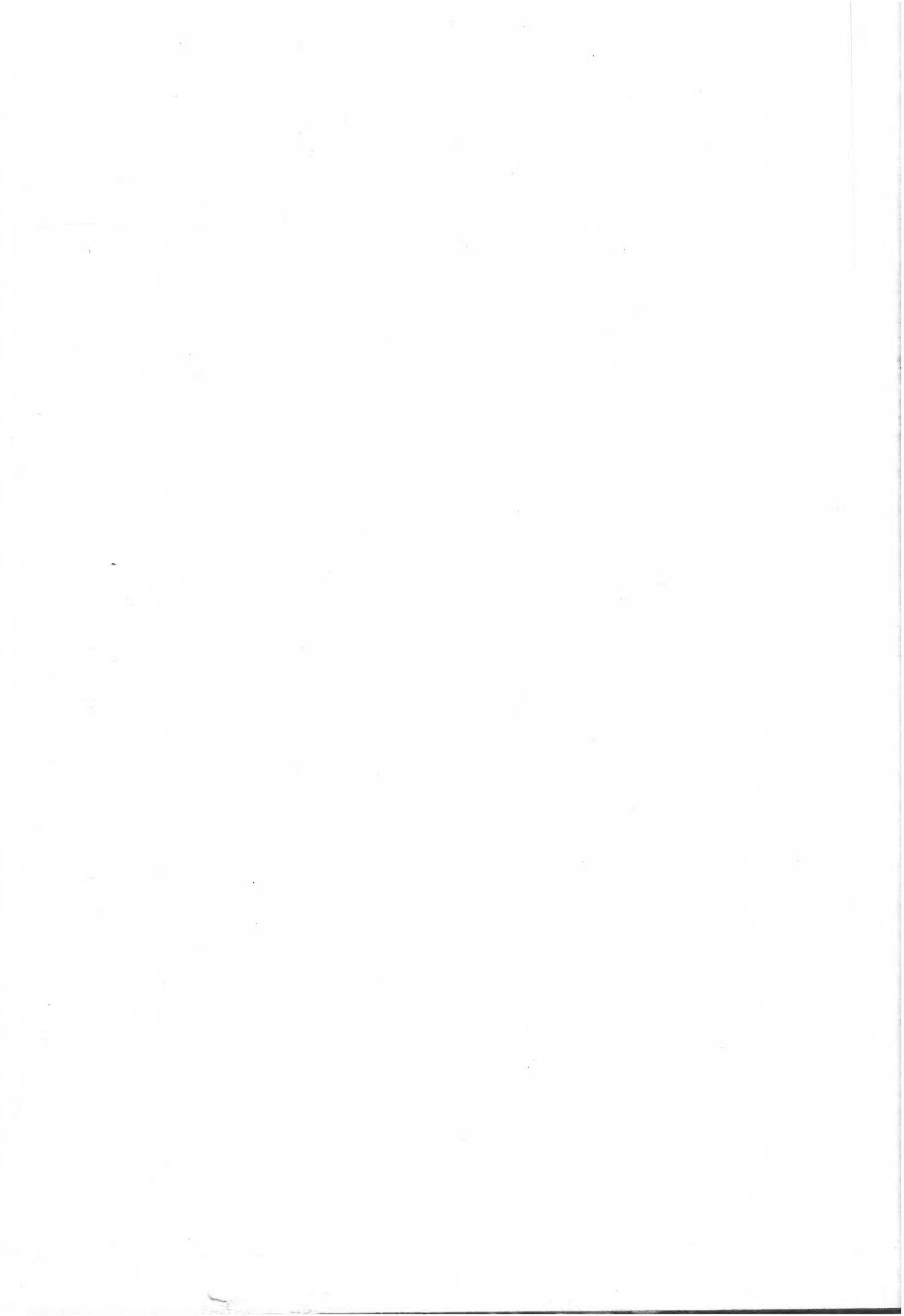


ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ







ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Под редакцией
А. И. Александрова



МОСКВА
«СОВЕТСКОЕ РАДИО»
1976

6Ф21

Э 41

УДК 621.396.967.004

Эксплуатация радиотехнических комплексов. Под ред. А. И. Александрова. М., «Сов. радио», 1976, 280 с.

Авт.: А. И. Александров, Г. А. Бобровник, А. С. Еременко и др.

В книге достаточно полно изложены вопросы теории и практики эксплуатации радиотехнических комплексов. В первом разделе рассмотрены основные положения теории эксплуатации, характеристики и критерии, используемые при оценке состояния радиотехнических систем в различных режимах, во втором — наиболее целесообразные пути и методы организации технического обслуживания, ремонта и хранения, в третьем — способы проверки и оценки технического состояния отдельных устройств, систем и комплекса в целом. Теоретическое изложение вопросов иллюстрировано примерами расчета. Основные положения книги могут быть распространены на многие радиотехнические устройства.

Книга рассчитана на инженеров, занимающихся эксплуатацией и проектированием радиотехнических устройств и систем, а также на студентов старших курсов радиотехнических факультетов вузов.

Рис. 91, табл. 57, библ. 104 назв.

А. И. АЛЕКСАНДРОВ, Г. А. БОБРОВНИК, А. С. ЕРЕМЕНКО,
Н. М. ПОЛЯКОВ, Ю. Б. РУСАНОВ.

**Редакция литературы
по вопросам космической радиоэлектроники**

Э $\frac{30405\text{-}073}{046(01)\text{-}76}$ 19-76

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эксплуатация современных радиотехнических комплексов представляет собой сложную проблему. Если 15—20 лет назад при эксплуатации радиотехнической аппаратуры в основном опирались на практический опыт обслуживающего персонала, то в настоящее время необходимо знать теоретические основы эксплуатации радиотехнических комплексов. Глубокие знания вопросов эксплуатации нужны как специалистам, непосредственно работающим на радиотехнических комплексах, так и инженерам, занимающимся их проектированием.

За последние 5—8 лет вышли из печати книги [4, 24, 30, 31 и др.], посвященные вопросам эксплуатации. Однако ни одна из них не охватывает всех основных вопросов, с которыми приходится сталкиваться специалисту при эксплуатации радиотехнических комплексов. Кроме того, сама теория эксплуатации развивается очень быстро и некоторые ее положения получили новую трактовку.

В предлагаемой читателю работе содержится достаточно полный перечень вопросов по теории и практике эксплуатации радиотехнических комплексов. Изложение многих вопросов иллюстрировано примерами расчета. Основные положения книги могут быть распространены на многие типы радиотехнических устройств.

При изложении материала учтены требования государственных стандартов на аппаратуру и терминологию.

Книга написана по материалам открытой отечественной и зарубежной литературы.

Гл. 4, 12, 14, 18 (за исключением § 18.1, 18.3), 19, а также § 6.11 писаны А. И. Александровым; гл. 13, 15, 17 и § 18.3 — Г. А. Бобровником; гл. 6 (за исключением § 6.11), 7, 8, 10 — А. С. Еременко; гл. 9, 11, 16 — Н. М. Поляковым; гл. 1—3, 5 и §18.1 — Ю. Б. Русановым.

В процессе работы над книгой были учтены многочисленные предложения и пожелания, высказанные специалистами, занимающимися эксплуатацией радиотехнических комплексов.

Авторы выражают особую признательность М. С. Алешину, Г. М. Мурзину и А. П. Ковтуненко за их труд по рецензированию рукописи книги, а также Н. В. Сретенскому, Ю. С. Гаврилову, В. М. Криксунову, С. А. Сенецкому и Е. К. Аухимовичу за ценные советы и рекомендации, которые во многом способствовали улучшению книги.

Авторы будут благодарны всем читателям, которые пришлют свои замечания и предложения по ее содержанию.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Δ — абсолютная разность, отклонение, абсолютная погрешность
δ — относительная погрешность
$P(t)$ — вероятность состояния системы в интервале $[0, t]$
$F(x)$ — функция распределения случайной величины
$f(x)$ — плотность распределения случайной величины
σ — среднеквадратическое отклонение
$D(x)$ — дисперсия случайной величины
$M[x]$ — математическое ожидание
Λ — интенсивность отказов системы
λ — интенсивность отказов элемента
$\omega(t)$ — параметр потока отказов
q — параметр (и числовые коэффициенты)
p — значение вероятности события (число)
α — статистическая ошибка 1-го рода (ложная тревога)
β — статистическая ошибка 2-го рода (пропуск)
N — число элементов системы
n — число отказов
m — число систем
S_i — i-е состояние системы (устройства);
K — коэффициент (готовности, простоя, использования и т. п.)
E_1, E_2 — коэффициенты технической эффективности
W — эффективность
$Э$ — выходной эффект
μ — интенсивность восстановления
$\Phi(t)$ — характеристика качества функционирования
$R(t)$ — относительный показатель качества функционирования
$r[t_1, t_2]$ — интегральный показатель качества функционирования
$\rho[t_1, t_2]$ — интегральный относительный показатель качества функционирования
t — текущее время
$T=\bar{t}$ — среднее значение времени
ξ — частота включений — выключений

Раздел I

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Радиотехнический комплекс (РТК) состоит из группы взаимосвязанных радиотехнических систем (РТС) и устройств и предназначается для выполнения определенных задач в полном их объеме. Ввиду сложности РТК при изложении материала книги авторы часто ограничиваются рассмотрением части его — отдельной системы или устройства, составляющего систему.

В настоящем разделе рассмотрены основные положения теории эксплуатации, характеристики и параметры, используемые для оценки состояния РТС и устройств в различных режимах. Приведены расчетные соотношения для различных показателей и установлена взаимосвязь между ними.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

1.1. РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА, СИСТЕМЫ, КОМПЛЕКСЫ

Радиотехническую аппаратуру, находящуюся в эксплуатации, можно представить в виде устройств, систем или комплексов. *Радиотехническое устройство* — это прибор определенного функционального назначения, например, радиопередающее, радиоприемное, антенно-фидерное и др. Радиотехническое устройство делится на блоки, узлы, каскады и элементы.

Совокупность функционально связанных радиотехнических устройств и других приборов, служащая для выполнения определенной задачи, составляет *радиотехническую станцию* или *радиотехническую систему.* Радиотехническая станция, как правило, состоит только из наземной или бортовой аппаратуры, в то время как РТС включает в свой состав и ту и другую. Примером станции является РЛС, служащая для обнаружения объекта в пространстве и определения его координат. Та же РЛС, но с ответчиком, расположенным, например, на борту объекта, будет составлять радиотехническую систему. Примером РТС, состоящих из наземной и бортовой частей, могут быть [2, 8, 12, 13]:

— радиотелеметрическая система, обеспечивающая прием и передачу информации с Земли на борт летательного аппарата;

— система траекторных (орбитальных) измерений, обеспечивающая измерение координат и параметров движения объекта;

— радиотехническая система управления полетом космических аппаратов;

— радиотехническая система посадки, обеспечивающая задачу точного определения координат космического аппарата при его движении в плотных слоях атмосферы и непосредственно перед приземлением, определение точного места приземления и т. д.

— система единого времени, обеспечивающая синхронизацию работы всех наземных устройств и бортовых приборов космического аппарата;

— система радио и телевизионной связи с космонавтами и др.

Под радиотехническим комплексом будем понимать группу радиотехнических систем и устройств, с помощью которых осуществляется выполнение определенных задач в полном их объеме. Примером РТК могут служить:

— радиотехнический комплекс обеспечения полетов самолетов [7], включающий радиотехническую систему навигации и посадки самолетов, РЛС определения координат, систему двухсторонней связи и управления;

— радиотехнический комплекс слежения за космическими объектами и управления ими [12], состоящий из следующих систем: траекторных (орбитальных) измерений, радиотелеметрической, единого времени, передачи команд управления и контроля их выполнения, автоматической обработки результатов измерений.

РТК управления космическими кораблями дополнительно включает в свой состав систему связи с космонавтами (радио и телевизионную), радиотехническую систему посадки и др.

Таким образом, в зависимости от назначения и решаемых задач РТК имеет различный состав, обладает различными техническими характеристиками и размещается на одном или нескольких пунктах. В связи с этим в большинстве случаев целесообразно рассматривать эксплуатационные процессы применительно к РТС (как основному элементу комплекса) или устройству и лишь в отдельных случаях к РТК в целом.

1.2. ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ ТЕОРИЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Прогресс современной науки и техники в области радиоэлектроники характеризуется появлением большого числа сложных РТС, предназначенных для решения разнообразных задач. Количественный рост таких систем приводит к значительному увеличению работающего с ними инженерно-технического состава, а их возрастающая сложность и многообразие решаемых задач — к необходимости совершенствования системы технического обслуживания и разработке научных основ эксплуатации РТС. Поэтому теория эксплуатации РТС превратилась в отдельное научное направление, имеющее свои теоретические основы.

Теория эксплуатации возникла на основе развития теории надежности, массового обслуживания, управления производством, контроля, эргономики и др. Она решает такие задачи, как приведение системы в рабочее состояние и поддержание ее в этом состоянии, использование по назначению с требуемой эффективностью, определение влияния

окружающей среды на технические характеристики аппаратуры и действие обслуживающего персонала в различных режимах эксплуатации РТС. Она обеспечивает разработку оптимальных методов организации процесса эксплуатации систем.

При проектировании новых РТС теория эксплуатации помогает правильно выбрать принципы конструирования аппаратуры для обеспечения заданных эксплуатационно-технических характеристик ремонтопригодности, сохраняемости и готовности, определить объем, содержание технического обслуживания и ремонтов, штатный состав обслуживающего персонала и разработать необходимую техническую документацию. В период проведения контрольной и опытной эксплуатации теория эксплуатации способствует выявлению свойств аппаратуры, обеспечивает проверку возможностей проведения различных мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту. В период основной эксплуатации (промышленной или войсковой) знание теории позволяет обеспечить оптимальные условия работы, оценить эффективность рекомендованных мероприятий по техническому обслуживанию, определить эксплуатационно-технические характеристики по статистическим данным, обоснованно планировать эксплуатационные мероприятия и реализовывать предложения по повышению эксплуатационной надежности.

К числу основных понятий теории эксплуатации относятся: «эксплуатация систем», «условия эксплуатации», «режимы работы», а также понятия, используемые в теории надежности, — «исправность», «неисправность», «работоспособность», «неработоспособность», «отказ», «повреждение» и др. [20, 23].

Эксплуатация — это совокупность подготовки и использования систем (комплексов) по назначению, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Контрольная эксплуатация [23] — это эксплуатация заданного количества систем в соответствии с требованиями технической документации, сопровождаемая контролем состояния каждой системы специально подготовленным персоналом.

Опытная эксплуатация [9] — это комплексная проверка готовности системы к сдаче в промышленную (войсковую) эксплуатацию с целью проверки тактико-технических характеристик в реальных условиях.

Условия эксплуатации — совокупность факторов, действующих на систему при эксплуатации. К условиям эксплуатации относятся климатические условия, механические и электрические нагрузки, квалификация обслуживающего персонала, обеспеченность материалами и т. п.

Режим работы — совокупность значений эксплуатационных параметров системы при использовании ее по назначению. К режимам работы относятся: мощность излучения, скорость передачи информации, продолжительность непрерывной работы и др.

Исправность (исправное состояние) — состояние системы, при котором она соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

Под *работоспособностью* будем понимать такое состояние системы, при котором она способна выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией. Понятие «исправность» шире понятия «работоспособность». Работоспособная система в отличие от исправной удовлетворяет лишь тем требованиям нормативной документации, которые обеспечивают ее нормальное функционирование при выполнении

заданных функций. При этом она может не удовлетворять, например, требованиям, относящимся только к внешнему виду.

Неисправность — состояние системы, при котором она не соответствует хотя бы одному из требований, установленных нормативно-технической документацией. Неисправная система может быть работоспособной, так как ее неисправности не настолько существенны, чтобы нарушать нормальное функционирование системы.

Неработоспособность — состояние системы, при котором значение хотя бы одного заданного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям, установленным нормативно-технической документацией. Следует различать устранимое и неустранимое состояние работоспособности. В первом случае работоспособность системы можно восстановить выполнением ремонтных работ. Во-втором случае восстановление работоспособности технически невозможно или экономически нецелесообразно.

Повреждение — событие, заключающееся в нарушении исправности системы.

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособности системы. Повреждение может быть незначительным или значительным. Первое означает нарушение исправности при сохранении работоспособности, второе — отказ системы. Некоторые незначительные повреждения со временем могут переходить в значительные и тем самым приводить системы к отказу.

В настоящее время существует широкая классификация отказов по различным признакам [10, 20]. В дальнейшем при рассмотрении вопросов эксплуатации РТС будут использованы в основном два вида отказов: внезапные и постепенные (определения этих отказов см. в [20]). Такая классификация отказов является наиболее важной, так как от этого деления зависят методы расчета надежности, периодичность проведения технического обслуживания и ремонта и т. п.

Признаки (критерии) различных отказов должны оговариваться в технической документации на аппаратуру данного типа. В качестве такого признака может быть описание состояния полного прекращения выполнения одной из основных функций (прекращение передачи или приема сигналов приемно-передающей аппаратуры, отсутствие регистрации принимаемой информации измерительных систем и т. д.).

Восстановление — процесс обнаружения и устранения отказа (повреждения) системы с целью восстановления ее работоспособности (исправности).

Восстанавливаемая система — это такая система, работоспособность которой в случае возникновения отказа подлежит восстановлению в рассматриваемой ситуации.

Невосстанавливаемая система — система, работоспособность которой в случае возникновения отказа не подлежит восстановлению в рассматриваемой ситуации.

Свойство системы непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки называется *безотказностью.*

Наработка — продолжительность работы системы.

Отметим, что обычно в понятие «система» не включают обслуживающий персонал. Учитывая успехи эргономики [1], такой подход непол-

---

[1] *Эргономика* — это технология связей в системе «человек — техника».

ностью отражает ряд других понятий. Например, при рассмотрении восстанавливаемой системы нельзя не учитывать роль обслуживающего персонала. Учет же его состава и квалификации значительно влияет на показатели восстановления. Поэтому в тех случаях, когда необходимо рассматривать систему и обслуживающий персонал в их совокупности, будем употреблять термин «человек — техника». Это означает, что если говорится об отказе системы «человек — техника», то учитывается или отказ системы, или отказ оператора.

Отказ оператора — состояние, которое приводит к полному или частичному невыполнению поставленной задачи в результате совершенных им ошибок [31].

Ошибка обслуживающего персонала — событие, состоящее в нарушении работоспособности системы из-за неправильного восприятия оператором получаемой информации, неправильного принятия решения или неправильного его выполнения. Естественно, ошибки операторов не равнозначны. Иная ошибка может быть компенсирована действиями другого оператора, но может привести к невозможности дальнейшего применения системы или полученный эффект от работы системы будет неполным.

Основной целью эксплуатации систем является обеспечение их работоспособности в различных состояниях и постоянной готовности этих систем к своевременному, безотказному и безошибочному применению для эффективного выполнения поставленной задачи.

1.3. РЕЖИМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ И РОЛЬ ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА

В процессе эксплуатации системы могут находиться в различных состояниях. При этом обслуживающий персонал должен обеспечить поддержание системы в заданном состоянии. Состояния системы «человек — техника», различающиеся целями, степенью готовности к применению, видами работы аппаратуры и обслуживающего персонала, будем называть *режимами эксплуатации.*

При эксплуатации систем можно выделить следующие режимы (рис. 1.1): транспортирование, хранение, подготовка и применение.

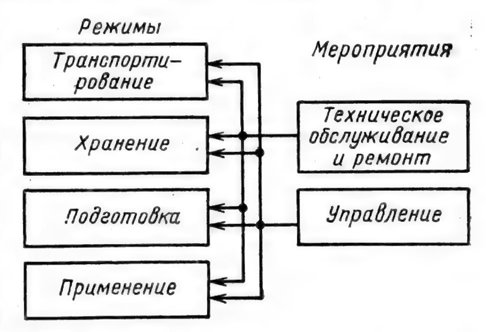


Рис. 1.1. Режимы эксплуатации систем и мероприятия, проводимые обслуживающим персоналом.

Приведение РТС в исходное положение для последующего применения начинается вводом ее в эксплуатацию. Объем работ при этом зависит от вида аппаратуры (стационарный или подвижный вариант).

При стационарном размещении систем вначале строятся технические здания, а затем выполняется монтаж всего оборудования, проводятся его автономные и комплексные испытания. По результатам этих испытаний принимается решение о вводе данной системы в эксплуатацию.

Для подвижных вариантов систем ввод в эксплуатацию начинается с расконсервации аппаратуры, развертывании ее на рабочей площадке, регулировки и проверки работоспособности.

Транспортирование (перевозка) аппаратуры системы, размещаемой стационарно, должно осуществляться всеми видами транспорта (автомобильным, железнодорожным, водным, авиационным) для доставки на место ее дальнейшей эксплуатации или при передаче из одной организации в другую.

Хранение — это содержание систем в специфических условиях, обеспечивающих поддержание тактических, технических и эксплуатационных характеристик в пределах норм, установленных технической документацией. Следует различать хранение в специальных помещениях (отапливаемых аппаратных, складах, базах, арсеналах) и в полевых условиях (на открытом воздухе, под навесом, в неотапливаемых сооружениях и т. п.). Основной целью хранения является поддержание систем в работоспособном состоянии путем защиты их от воздействия окружающей среды. В процессе хранения проводятся мероприятия по техническому обслуживанию и ремонту.

Техническое обслуживание (ТО) — это комплекс работ для поддержания исправности или только работоспособности системы при подготовке и использовании по назначению, при хранении и транспортировании [29]. Основной целью ТО систем является поддержание технических и эксплуатационных характеристик в установленных пределах, обеспечивающих применение этих систем с заданной эффективностью.

Под *ремонтом* понимается [29] комплекс работ для поддержания и восстановления исправности или работоспособности системы. С целью обеспечения показателей качества, предусмотренных в нормативной документации, для каждого типа систем применительно к заданным условиям эксплуатации разрабатывается своя организация и порядок проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту. Примером этого является планово-предупредительная система организации технического обслуживания и ремонта, включающая планирование, подготовку и реализацию ТО и ремонтов определенных типов систем с заданной последовательностью и периодичностью.

Режим подготовки начинается с операций по переводу аппаратуры в режим применения. Такими операциями, например, являются: установка заданного вида работы аппаратуры, проверка функционирования и настройка в соответствии с заданным видом работы аппаратуры, контроль уровня помех и принятие мер к уменьшению их уровня и т. д. В случае необходимости проводятся мероприятия по техническому обслуживанию и ремонту.

Итак, под *режимом подготовки* следует понимать состояние системы, обеспечивающее перевод ее к применению или повышению ее готовности к применению.

Подготовку систем к применению можно разделить на три периода: предварительная подготовка, дежурство (ожидание) и заключительная подготовка.

В процессе предварительной подготовки систем производится повышение их готовности до заданного уровня. При этом обслуживающий персонал выполняет ряд операций по переводу систем в режим применения или по повышению их готовности до заданного уровня.

Из рассматриваемых периодов подготовки следует выделить период дежурства, при котором состояние системы «человек — техника» обеспечивает требуемую готовность ее к применению. Продолжительность этого периода зависит от условий применения данной аппаратуры, решаемых задач и поступающих распоряжений об ее использовании.

Для различных РТС может быть установлена одна или несколько видов (степеней) готовности [31], которые в процессе дежурства могут изменяться. При повышении степени готовности обслуживающий персонал выполняет дополнительные подготовительные работы, обеспечивающие требуемую готовность. При уменьшении степени готовности вследствие ухудшения значений отдельных параметров, появления повреждений и отказов выполняются работы по восстановлению работоспособности (исправности) систем.

Режим применения — состояние системы при использовании ее по прямому назначению для выполнения поставленной задачи. В режиме применения систем выполняются мероприятия по техническому обслуживанию, ремонту, а также осуществляются операции по управлению аппаратурой.

Управление — это совокупность мероприятий, выполняемых обслуживающим персоналом во время эксплуатации систем в различных режимах. В зависимости от режима эксплуатации содержание этих мероприятий различно.

Целью управления в режиме транспортирования является поддержание требуемых условий транспортировки, оговоренных в эксплуатационной документации.

В режиме хранения управление сводится к совокупности мероприятий, выполняемых обслуживающим персоналом при выборочном контроле, техническом обслуживании, ремонте и при поддержании требуемых условий хранения систем.

Целью управления системами в режиме подготовки является обеспечение регламентированного и качественного выполнения всех операций по подготовке аппаратуры к применению.

В режиме применения с помощью управления достигается максимальная эффективность использования системы в данных условиях.

В зависимости от проведения технического обслуживания и восстановления в режиме применения радиотехническая аппаратура делится на аппаратуру однократного применения, многократного и непрерывного действия [30].

Аппаратура однократного применения используется один раз для выполнения определенных задач. Последующее ее применение или невозможно (аппаратура разрушается), или нецелесообразно (например, из-за большой наработки). Эта аппаратура не восстанавливается в процессе эксплуатации. К ней относится бортовая радиотехническая аппаратура космических аппаратов, ракет, метеорологических шаров-радиозондов и т. д.

Аппаратура многократного применения используется с перерывами различной продолжительности в зависимости от интенсивности решения задач. К ней относятся наземные радиотехнические станции разного назначения (орбитальных измерений, телеметрии, радиолокации, телевидения и т. д.).

Аппаратура непрерывного действия выключается только в случае отказа и при выполнении соответствующего технического обслуживания. К аппаратуре данного типа можно отнести радиоприемники, работающие в режиме длительного дежурного приема, ретрансляторы радиорелейных линий связи, некоторые типы РЛС, радиомаяки и др.

Аппаратура многократного применения и непрерывного действия является восстанавливаемой.

1.4. ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

На рис. 1.2 показана динамика изменения состояний систем при смене режимов эксплуатации.

После ввода в эксплуатацию и проведения подготовительных работ, обеспечивающих работоспособность аппаратуры и готовность об-

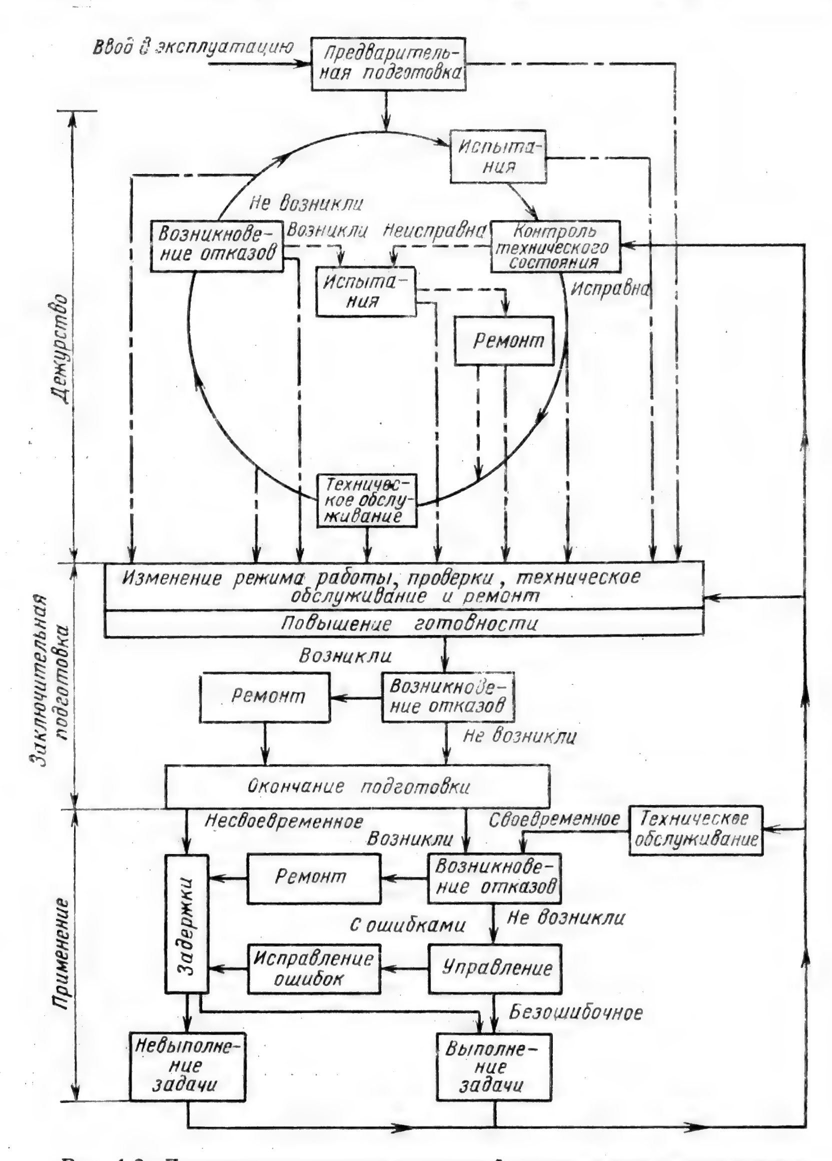
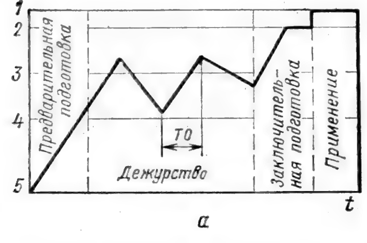


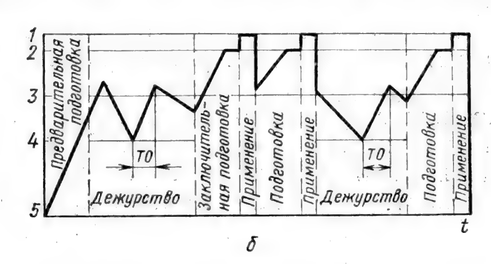
Рис. 1.2. Динамика изменения состояний системы при эксплуатации.

служивающего персонала к выполнению эксплуатационных мероприятий, системы «человек — техника» находятся в состоянии ожидания (дежурства). В этот период аппаратура может находиться в различных степенях готовности, отличающихся временем ее перевода в режим

применения, подвергаться систематическому контролю технического состояния и техническому обслуживанию. Выявление отказов и повреждений осуществляется при контроле технического состояния. Затем производятся испытания (проверка основных параметров, поиск и устранение отказов и т. д.) и ремонт аппаратуры. Период дежурства может быть продолжительным [31].

В момент получения распоряжения на подготовку к применению режим ожидания прерывается независимо от того, в каком состоянии





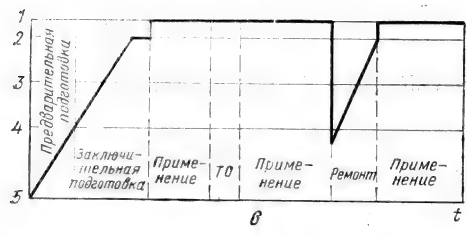


Рис. 1.3. Изменение готовности систем однократного (*а*), многократного (*б*) и непрерывного (*в*) применения в процессе эксплуатации:

1 — состояние применения; *2* — состояние системы перед применением; *3*, *4* — промежуточные состояния системы при подготовке к применению; *5* — состояние системы перед началом подготовки; ТО — техническое обслуживание.

находится аппаратура. Переход из любого состояния в состояние заключительной подготовки на рис. 1.2 показан штрих-пунктирными линиями со стрелками.

Период дежурства характерен для аппаратуры РТС однократного и многократного применения.

Режим подготовки может быть окончен своевременно или с задержкой.

Задержка — это событие, происходящее в системе «человек — техника» из-за отказа аппаратуры или отказа оператора в режимах подготовки или применения, приводящее к невозможности своевременного выполнения поставленной задачи. Задержки приводят к невыполнению поставленной задачи, если фактор времени имеет первостепенное значение.

В режиме применения систем по прямому назначению обслуживающий персонал выполняет операции по управлению аппаратурой. Ошибки управления приводят к задержкам или к невыполнению задачи. К аналогичным результатам приводят и возникающие в режиме применения отказы.

Описанный порядок смены режимов эксплуатации характерен для аппаратуры РТС однократного применения. На рис. 1.3,*а* показана одна из реализаций изменения готовности этой аппаратуры в процессе эксплуатации.

Аппаратура РТС многократного применения после выполнения или невыполнения задачи может быть возвращена в любой период подготовки с последующим применением. Это зависит от указаний руководителей и условий работы (рис. 1.3,*б*).

Для аппаратуры РТС непрерывного действия период дежурства не характерен (рис. 1.3,*в*). После предварительного и заключительного периода подготовки аппаратура используется по прямому назначению, периодически подвергаясь техническому обслуживанию и ремонту. Последнее приводит к задержкам при выполнении поставленной задачи.

Следует также иметь в виду, что аппаратура РТС до ввода в эксплуатацию может храниться на базах, арсеналах или складах. После ввода в эксплуатацию этот режим может повториться. Так, для аппаратуры однократного применения режим хранения может быть продолжен после ее установки на объекте и помещения объекта в хранилище или установки на дежурство (хранение в специальных сооружениях).

Аппаратура многократного применения после ввода в эксплуатацию может храниться в аппаратных залах в периоды, не связанные с подготовкой и применением. Кроме того, подобная аппаратура перед отправкой в капитальный ремонт демонтируется, хранится, а затем транспортируется на ремонтное предприятие.

Таким образом, для аппаратуры многократного применения все режимы эксплуатации могут неоднократно повторяться, чередуясь между собой.

1.5. ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Степень приспособленности какой-либо системы к выполнению определенных функций в конкретных условиях в течение заданного времени обычно называют *эффективностью* этой системы. Для оценки эффективности используются специальные критерии. В [15, 32] рекомендуется решать практические задачи на основе раздельной оценки технической и экономической эффективности исследуемых систем. Критерии технической эффективности представляют собой итоги сравнения (например, в виде разности или отношения) технической эффективности реальной и идеальной системы

$$E_1=E_1(W,\ W_{\text{ид}}), \qquad (1.1)$$

в критерии экономической эффективности — итоги сравнения реальной эффективности системы и стоимости ее производства и эксплуатации C, т. е.

$$E_2=E_2(W,\ C). \qquad (1.2)$$

В качестве критерия для оценки технической эффективности систем могут быть использованы следующие зависимости:

$$E_1=W/W_{\text{ид}}, \quad (1.3) \qquad\qquad E_2=W/C, \qquad (1.4)$$

где W — реальная техническая эффективность (в смысле надежности) в результате использования системы по назначению; $W_{\text{ид}}$ — идеальная предельная техническая эффективность, которая может быть достигнута при использовании тактических и технических характеристик системы в полном объеме; C — стоимость производства и эксплуатации системы. Величину E_1 некоторые авторы называют коэффициентом сохранения эффективности [15].

Выражения (1.3), (1.4) являются достаточно наглядными и могут быть использованы для оценки эффективности как существующих, так и проектируемых систем.

Реальная техническая эффективность системы есть функция ее технических характеристик, полученных в соответствующих условиях при-

менения. При таком широком подходе к определению реальной эффективности ее трудно выразить количественно, поэтому пользуются более узким понятием технической эффективности, под которым понимают величину выходного эффекта системы.

В качестве такого упрощенного показателя технической эффективности обычно применяется или математическое ожидание некоторой случайной величины выходного эффекта

$$W=M\{Э\}, \tag{1.5}$$

или вероятность того, что полученный выходной эффект системы не хуже заданного ($Э_{доп}$):

$$W=P\{Э \geqslant Э_{доп}\}. \tag{1.6}$$

Так, например, техническая эффективность цифровых РТС передачи информации оценивается скоростью передачи информации [2, 7]

$$v_{пи}=\log L-p_{ош1}\log(L-1)+p_{ош1}\log p_{ош1}+ \\ +(1-p_{ош1})\log(1-p_{ош1}), \tag{1.7}$$

где $v_{пи}$ — скорость передачи информации, бит/с; L — число дискретных уровней, используемых для передачи информации; $p_{ош1}$ — вероятность ошибки при передаче одного символа.

Однако любая система передачи информации, обладая необходимыми показателями технической эффективности вида (1.7), должна обладать соответствующей безотказностью в течение заданного времени при заданных условиях работы. Поэтому реальная техническая эффективность простых систем вычисляется по формуле [15]

$$W=K_{г}P_{пр}\,W_{ид}, \tag{1.8}$$

где $K_{г}$ — коэффициент готовности системы, под которым понимается вероятность того, что в начале режима применения все элементы системы работоспособны; $P_{пр}$ — условная вероятность безотказного функционирования всех элементов системы в режиме применения при условии, что в начале этого режима все элементы системы работоспособны.

Под простой системой в данном случае понимают аппаратуру, имеющую всего два состояния: работоспособна, неработоспособна. Величина $W_{ид}$ определяется основными техническими характеристиками системы (например, скоростью передачи информации) и согласно выражению (1.3) не зависит от характеристик надежности.

Выражения (1.3)и (1.8) приводят к известному уравнению, определяющему безусловную вероятность безотказного функционирования простой системы в режиме применения $E_1=K_{г}P_{пр}$.

Для сложной системы, т. е. такой системы, которая в процессе эксплуатации может принимать более двух состояний, реальная техническая эффективность определяется соотношением

$$W=\sum_{n=0}^{N}\sum_{i=1}^{C_N^n}P_{ni}W_{ni},$$

где P_{ni} — вероятность S_{ni} состояния системы, когда неработоспособны n элементов; W_{ni} — показатель эффективности S_{ni} состояния системы; $C^n_N=N!/[n!(N-n)!]$; N — общее число элементов в системе.

Учитывая сказанное, в общем виде математическое ожидание выходного эффекта системы может быть выражено интегралом Стилтьесе

$$W = \int_G Э(t)\, dP(t),$$

где $Э(t)$ — выходной эффект системы; $P(t)$ — показатель надежности этой системы (например, вероятность безотказной работы); G — область работоспособности системы.

Для информационных радиотехнических систем в качестве выходного эффекта можно взять величину информативности. При этом для оценки эффективности таких систем обычно пользуются некоторой обобщенной технико-экономической характеристикой

$$W = \int_G \frac{I(t)}{C}\, dP,$$

где $I(t)$ — информативность РТС.

1.6. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ

Из § 1.5 видно, что эффективность РТС зависит не только от тактических и технических характеристик аппаратуры, но и от надежности и других эксплуатационных особенностей аппаратуры РТК. Согласно ГОСТ 13377—75 надежность системы обусловливается безотказностью, ремонтопригодностью, сохраняемостью, а также долговечностью ее частей.

Надежность как свойство систем выполнять заданные функции в течение требуемого промежутка времени в полной мере проявляется в процессе эксплуатации, ибо высокая надежность систем значительно упрощает их эксплуатацию, а низкая —наоборот обусловливает частое проведение технического обслуживания и ремонтов, что приводит к увеличению расходов при эксплуатации таких систем. Оценивая надежность систем, необходимо учитывать и работу обслуживающего персонала, зависящую от условий их жизни, состояния здоровья, физической подготовленности, рациона питания, режима жизни и т. п.

Системы, находящиеся в эксплуатации, характеризуются их готовностью к переводу из любого исходного состояния в режим применения, затратами на проведение технического обслуживания и ремонта, стоимостью работы аппаратуры в режиме применения и другими затратами.

Организация эксплуатации систем характеризуется безотказностью системы «человек — техника», ее восстанавливаемостью, долговечностью, сохраняемостью и стоимостью эксплуатации.

Восстанавливаемость системы «человек — техника» определяется как вероятность восстановления системы за время неисправного состояния, не превышающее заданное. Она характеризуется ремонтопригодностью системы, числом и квалификацией обслуживающего персонала и зависит от удобства выполнения операций по восстановлению.

Очевидно, чем меньше время, затрачиваемое на обнаружение и устранение отказа системы, тем лучше восстанавливаемость системы «человек — техника» в целом и выше эффективность применения систем (см. § 1.5). Обычно безотказность и восстанавливаемость объединяются в одну эксплуатационно-техническую характеристику, которая называется *готовностью систем* (см. гл. 4).

Под *долговечностью* понимается свойство системы сохранять работоспособность до наступления предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов [20]. (Предельное состояние обычно оговаривается в технической документации.) Из этого определения видно, что в основу долговечности систем, как и безотказности, положено их свойство сохранять работоспособность. Разница между этими понятиями в том, что безотказность связана с непрерывным сохранением работоспособности, а долговечность — с сохранением работоспособности до предельного состояния с необходимыми перерывами.

Свойство системы непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение и после хранения или транспортирования называется *сохраняемостью*. Сохраняемость зависит от условий хранения. Эти условия должны быть такими, чтобы системы после хранения можно было использовать по прямому назначению с требуемой эффективностью.

Для количественной оценки рассмотренных эксплуатационно-технических характеристик систем используются показатели, которые можно разбить на три группы: временные, вероятностные и стоимостные.

Временные показатели позволяют оценить продолжительность процессов на различных этапах эксплуатации систем. Например, время безотказной работы, время подготовки к применению, время восстановления, продолжительность технического обслуживания и т. д. Для разных образцов однотипных систем и различных групп обслуживающего персонала рассматриваемые величины носят случайный характер. Зная закон распределения случайной величины, заданный в виде функции или плотности распределения, можно определить ее числовые характеристики (математическое ожидание, дисперсию и т. д.).

Вероятностные показатели эксплуатационно-технических характеристик определяются по вероятности наступления интересующего события, соответствующего исследуемой характеристике. Например, надежность систем характеризуется вероятностью безотказной работы в течение заданного времени, восстанавливаемость — вероятностью восстановления в течение заданного времени, готовность — вероятностью подготовки в течение заданного времени и т. п.

В качестве *стоимостных показателей* эксплуатационно-технических характеристик применяются стоимость и трудоемкость выполнения различного рода работ, выполняемых обслуживающим персоналом в процессе эксплуатации. При этом обычно учитываются расходы на содержание обслуживающего персонала, стоимость запасных элементов и расходных материалов, амортизационные расходы и т. д. До настоящего времени учету расходов при эксплуатации РТС уделялось недостаточное внимание, а эти расходы могут достигать значительных сумм. Так, например, по данным военного ведомства США [27] затраты на обслуживание РЭА сухопутных войск во время первых пяти лет ее эксплуатации составили три четверти от первоначальных затрат на ее приобретение.

Знание реальных расходов по эксплуатации систем позволяет выявить более экономичные приемы и методы выполнения различных работ при техническом обслуживании, ремонте, в режимах подготовки и применения, а также дает возможность определить целесообразность использования аппаратуры при резком увеличении эксплуатационных расходов.

Глава 2

НАДЕЖНОСТЬ И СТОИМОСТЬ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

2.1. ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ ПРОСТЫХ СИСТЕМ

Под *простой системой* будем понимать такую систему, которая в процессе эксплуатации принимает только два состояния: работоспособна и неработоспособна. Надежностью такой системы называется свойство ее выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования [20]. Надежность, как известно, обусловливается безотказностью, ремонтопригодностью, сохраняемостью и долговечностью отдельных частей системы. Для количественной оценки этих свойств, а также степени и характера влияния на выполнение возложенных на систему функций используются различные показатели надежности. Перечень рекомендуемых показателей надежности простых систем приведен в [17].

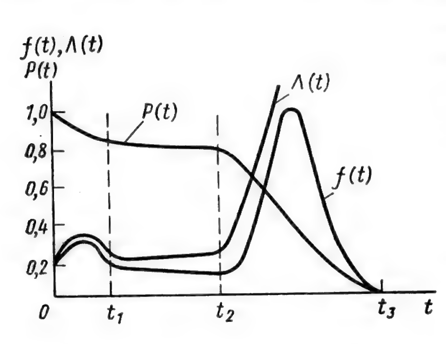


Рис. 2.1. Изменение основных показателей надежности невосстанавливаемых систем: интенсивности отказов $\Lambda(t)$, плотности распределения времени $f(t)$ и вероятности $P(t)$ безотказной работы.

Основными показателями безотказности простых схем являются [10, 21, 22, 33, 34]:

а) для невосстанавливаемых систем — интенсивность отказов, вероятность безотказной работы и средняя наработка до отказа;

б) для восстанавливаемых систем — наработка на отказ, параметр потока отказов и вероятность безотказной работы.

Интенсивность отказов — условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемой системы, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник. Экспериментально интенсивность отказов можно определить по формуле

$$\Lambda^* = n(\Delta t)/m\Delta t, \quad (2.1)$$

где $n(\Delta t)$ — количество отказов, появившееся в интервале Δt; m — общее число невосстанавливаемых систем, работоспособных в начале интервала Δt.

На рис. 2.1 показано изменение Λ в зависимости от времени эксплуатации. Начальный период (интервал от 0 до t_1) эксплуатации невосстанавливаемых систем характеризуется повышенной интенсивностью отказов из-за ошибок конструирования, изготовления, монтажа и т. д. Этот период называется *периодом приработки.*

Когда период приработки пройден, элементы системы приобретают однородность, наступает период нормальной эксплуатации (интервал t_1—t_2), характеризующийся относительным постоянством интенсивно-

сти отказов ($\Lambda(t)=\text{const}$). Поэтому на практике при расчетах показателей безотказности пользуются экспоненциальным распределением.

После продолжительного периода нормальной эксплуатации начинает сказываться износ и старение элементов системы. Этот период характеризуется непрерывным ростом интенсивности отказов вследствие изменения физико-механических свойств и падения сопротивляемости элементов и систем внешним нагрузкам и называется *периодом износа.* С наступлением его (момент t_2) эксплуатация системы, как правило, прекращается.

Вероятность безотказной работы есть вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ системы не возникает.

Согласно этому определению

$$P(t)=P(t_{\text{р}}\geqslant t), \tag{2.2}$$

где t — время, в течение которого определяется вероятность безотказной работы; $t_{\text{р}}$ — время работы (наработка) системы до первого отказа.

Наработка до момента отказа $t_{\text{р}}$ является случайной величиной. Закон ее распределения определяется плотностью вероятности $f(t)$. Тогда

$$P(t)=\int_t^{\infty} f(t)\,dt. \tag{2.3}$$

Вероятность безотказной работы и интенсивность отказов связаны между собой следующей зависимостью:

$$P(t)=\exp\left[-\int_0^t \Lambda(t)\,dt\right]. \tag{2.4}$$

Выражение (2.4) справедливо при любом законе распределения интенсивности отказов. При $\Lambda(t)=\text{const}$ это выражение имеет вид

$$P(t)=\exp(-\Lambda t). \tag{2.5}$$

Формулой (2.5) пользуются при расчете вероятности безотказной работы. Изменение $P(t)$ в зависимости от времени эксплуатации показано на рис. 2.1.

Средняя наработка до отказа определяется как математическое ожидание наработки системы до первого отказа

$$T=\int_0^{\infty} t f(t)\,dt. \tag{2.6}$$

Если учесть, что t положительно и $P(0)=1$, а $P(\infty)=0$, то

$$T=\int_0^{\infty} P(t)\,dt, \tag{2.7}$$

или с учетом (2.5)

$$T=\int_0^{\infty} \exp(-\Lambda t)\,dt=1/\Lambda. \tag{2.8}$$

Таким образом, при постоянной интенсивности отказов средняя наработка до отказа равна обратной величине интенсивности отказов.

Пример 2.1. Наработка системы до отказа подчиняется экспоненциальному распределению с параметром $\Lambda = 10^{-3}$ ч$^{-1}$. Определить среднюю наработку до отказа и вероятность безотказной работы в течение $t=200$ ч.

Решение. 1. По формуле (2.8) вычислим среднюю наработку до отказа

$$T = 1/10^{-3} = 1000 \text{ ч}.$$

2. По формуле (2.5) определим вероятность безотказной работы системы в течение 200 ч

$$P(200) = \exp(-10^{-3} \cdot 200) = 0{,}82.$$

При оценке вероятности безотказной работы в реальных условиях эксплуатации следует учитывать, что в момент включения — выключения аппаратуры увеличивается интенсивность отказов.

Так, например, при рассмотрении вопроса о возникновении отказов в корабельной РЭА один цикл «включено — выключено» эквивалентен 8 ч непрерывной работы [25]. Под циклом «включено — выключено» понимается интервал времени от момента включения системы до момента ее выключения.

Вероятность безотказной работы в зависимости от суммарной наработки и количества циклов «включено — выключено» определяется следующим выражением [25]:

$$P(t, \xi) \approx \exp[-(\Lambda t + n_{\text{цк}}\varkappa)]$$

или

$$P(t, \xi) = \exp[-\Lambda t(1 + k_{\text{цк}}\xi)], \tag{2.9}$$

где $n_{\text{цк}}$ — число отказов системы за один цикл «включено — выключено»; $\varkappa$ — число циклов «включено — выключено»; $\xi = \varkappa/t$ — частота включений, т. е. число циклов «включено — выключено» в единицу календарного времени эксплуатации; $k_{\text{цк}} = n_{\text{цк}}/\Lambda$ — коэффициент цикличности.

Выражение (2.9) получено экспериментально. Очевидно, для инженерной практики необходимо было бы указать области применения этого выражения в зависимости от предельных значений частоты включений. Однако этот вопрос пока еще не решен.

Для восстанавливаемых систем характерно чередование времени исправной работы и времени восстановления (ремонтов). Если для каждой системы в течение времени t фиксировать число отказов $n_i(t)$, то среднее число отказов для m однотипных образцов за время t определится по формуле

$$n^*(t) = \sum_{i=1}^{m} n_i(t)/m. \tag{2.10}$$

Если в (2.10) число образцов $m \to \infty$, то получим ведущую функцию потока отказов — математическое ожидание числа отказов за время t:

$$H(t) = \lim_{m\to\infty}\left[\sum_{i=1}^{m} n_i(t)/m\right] = M[n(t)]. \tag{2.11}$$

При экспоненциальном распределении наработка между отказами $H(t) = \Lambda t$, где Λ — параметр распределения. В этом случае оценка для ведущей функции потока отказов определяется по формуле $H^*(t) = \Lambda^* t$.

Зная значение функции $H(t)$, можно записать точное уравнение для определения параметра потока отказов [20]

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{M[n(t, t+\Delta t)]}{\Delta t} = H'(t), \tag{2.12}$$

где Δt — интервал времени между отказами. Эта формула справедлива для ординарных потоков без последействия, когда параметр потока отказов совпадает с интенсивностью потока.

Параметр потока отказов есть плотность вероятности возникновения отказов восстанавливаемых систем, определяемая для рассматриваемого момента времени. При этом параметр потока отказов связан с ведущей функцией соотношением

$$H(t) = \int_0^t \omega(x)\,dx. \qquad (2.13)$$

При экспоненциальном распределении наработки между отказами $\omega(t) = \Lambda$. В этом случае оценка для параметра потока отказов определяется формулой

$$\omega^*(t) = \Lambda^*. \qquad (2.14)$$

Основным показателем надежности восстанавливаемых систем является *наработка на отказ*, под которой понимается отношение наработки восстанавливаемой системы к математическому ожиданию числа ее отказов в течение этой наработки. Наработка на отказ статистически определяется отношением суммарной наработки восстанавливаемых систем к суммарному числу отказов этих систем. Вычисление наработки на отказ по данным эксплуатации одного образца производится по формуле

$$T_{\text{о}} = \sum_{i=1}^{n} t_{\text{о}i}/n, \qquad (2.15)$$

где $t_{\text{о}i}$ — наработка между соседними отказами, n — число отказов за рассматриваемый период эксплуатации.

При экспоненциальном распределении наработки между отказами оценка для наработки на отказ определяется формулой $T^*_{\text{о}} = 1/\Lambda^*$.

Величина наработки на отказ в общем случае зависит от длительности периода, в течение которого она определяется. Это обусловлено непостоянством характеристик потока отказов.

Для восстанавливаемых систем широко используется вероятность безотказной работы в период между наработками $t_{\text{о}1}$ и $t_{\text{о}2}$. Эта вероятность вычисляется по формуле

$$P(t_{\text{о}2} - t_{\text{о}1}) = \exp[H(t_{\text{о}1}) - H(t_{\text{о}2})]. \qquad (2.16)$$

Из рассмотренных показателей безотказности в соответствии с [17] в качестве показателей надежности простых систем следует выбирать: вероятность безотказной работы за определенный интервал времени $P(t)$, среднюю наработку до отказа T, параметр потока отказов в период нормальной эксплуатации $\omega(t)$, наработку на отказ $T_{\text{о}}$.

2.2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

С точки зрения надежности РТС следует рассматривать как сложную систему. Согласно [19] под ***сложной системой*** понимается совокупность взаимосвязанных элементов, обеспечивающих выполнение заданных функций несколькими различными способами, отличающимися уровнями качества функционирования системы.

В данном определении *элементом системы* называется часть системы, выполняющая определенные функции и не подлежащая дальнейшему расчленению на части при данной степени подробности рассмотрения системы (деталь, узел, прибор, простая система).

Для простых систем, элементы которых соединены последовательно, отказ элемента приводит к нарушению работоспособности системы в целом. Для многих сложных систем отказы некоторых элементов не приводят к потере работоспособности системы в целом, и она может выполнить свою задачу. Поэтому различают полный и частичный отказ сложной системы. *Полный отказ сложной системы* — отказ, после возникновения которого использование системы по назначению невозможно до восстановления ее работоспособности. *Частичный отказ сложной системы* — отказ элемента системы, после возникновения которого использование системы по назначению возможно, но при этом значение одного или нескольких основных параметров находится вне допустимых пределов.

Уровень качества функционирования сложной системы представляет собой отношение характеристики качества функционирования системы в данном состоянии $\Phi_s(t)$ к характеристике качества функционирования комплекса в исправном состоянии $\Phi_и(t)$ [19]:

$$R(t) = \Phi_s(t) / \Phi_и(t), \tag{2.17}$$

$R(t)$ выражается в долях или процентах характеристики качества функционирования системы в исправном состоянии.

Отсюда видно, что характеристика качества функционирования является количественной оценкой качества функционирования системы в определенном ее состоянии при выполнении данной задачи.

Частичный отказ системы может приводить (а может и не приводить) к снижению уровня качества функционирования системы или, как еще говорят, к спаду функционирования.

Так как состояния системы могут быть различными и выполняемые задачи разнообразными (особенно для многофункциональных систем), то характеристику качества функционирования можно представить в виде

$$\Phi_s(t) = \Phi[\overline{S}(t)], \tag{2.18}$$

где $\overline{S}(t) = \begin{vmatrix} S_1(t) \\ \vdots \\ S_i(t) \\ S_{i+1}(t) \\ \vdots \\ S_z(t) \end{vmatrix}$ — случайный вектор состояний системы в момент времени t.

Причем подмножество $\{S_1(t), \ldots, S_i(t)\}$ — число состояний системы, выраженное, например, значениями различных параметров, а подмножество $\{S_{i+1}(t), \ldots, S_z(t)\}$ указывает число решаемых задач, в том числе и задач при проведении технического обслуживания. Первое подмножество, кроме того, может означать состояние элементов систе-

мы. Например,

$$S_i(t)=\begin{cases}1, & \text{если } i\text{-й элемент работоспособен,}\\ 0, & \text{если } i\text{-й элемент неработоспособен.}\end{cases}$$

Итак, если известны задачи системы, то каждому ее состоянию $\bar{S}(t)$ соответствует определенное значение характеристики качества функционирования системы (2.18) в этом состоянии. Эта характеристика зависит только от состояния системы (при фиксированной задаче), позволяет оценить количественно степень приспособленности системы к выполнению задачи в данном состоянии и является мгновенной оценкой ее функционирования.

Показателем качества функционирования системы в момент времени t следует считать математическое ожидание случайной функции $\Phi_s(t)$ как среднее по множеству наблюдений случайного процесса $\Phi[\bar{S}(t)]$ в момент t:

$$\Phi(t)=M\{\Phi_s(t)\}=M\{\Phi[\bar{S}(t)]\}. \tag{2.19}$$

Соответственно показателем качества функционирования системы в исправном состоянии (идеальной, абсолютно безотказной системы) в момент t является условное математическое ожидание функции $\Phi_s(t)$ при условии исправного состояния $\bar{S}_и(t)$ системы:

$$\Phi_и(t)=M\{\Phi_s(t)/\bar{S}_и(t)\}, \tag{2.20}$$

где $\bar{S}_и(t)=\begin{vmatrix}1\\ \vdots\\ 1\\ S_{i+1}(t)\\ \vdots\\ S_z(t)\end{vmatrix}$,

т. е. в исправном состоянии все элементы подмножества $\{S_1(t)\ \ldots,\ S_i(t)\}$, описывающие состояние элементов системы, равны 1. Поэтому величина $\Phi_и(t)$ указывает, нужно выполнять задачу в момент времени t или нет. Например, для однофункциональной системы вектор состояний запишем в виде

$$\bar{S}_{и1}(t)=\begin{vmatrix}1\\ \vdots\\ 1\\ S_{i+1}(t)\end{vmatrix}; \tag{2.21}$$

выражение (2.20) будет выглядеть так:

$$\Phi_и(t)=M\{\Phi_{sи}(t)\}; \tag{2.22}$$

$$\Phi_{sи}(t)=\begin{cases}\Phi_и, & \text{если } S_{i+1}(t)=1,\\ 0, & \text{если } S_{i+1}(t)=0,\end{cases} \tag{2.23}$$

где $\Phi_{sи}(t)$ — характеристика качества функционирования идеальной системы в произвольный момент времени; $\Phi_и$ — характеристика качества

функционирования системы в исправном состоянии (в момент выполнения задачи). Отсюда следует, что

$$\Phi_{и}(t)=\Phi_{и}P_{sи}(t), \qquad (2.24)$$

где $P_{sи}(t)=P\{S_{i+1}(t)=1\}$ — вероятность того, что в момент t есть потребность в выполнении задачи.

В соответствии с (2.17) отношение показателя качества функционирования реальной системы к показателю качества функционирования идеальной (абсолютно безотказной) системы называется относительным *показателем качества функционирования.* Этот показатель дает мгновенную оценку надежности системы и представляет собой математическое ожидание уровня качества функционирования ее в данный момент времени.

В диапазоне возможных значений характеристики $\Phi_s(t)$ качества функционирования системы можно выделить упорядоченный ряд фиксированных ее значений:

$$\Phi_{и}>\Phi_1> \dots >\Phi_j, \qquad (2.25)$$

где $\Phi_{и}$ — характеристика качества функционирования исправной системы.

Примем максимальное значение $\Phi_{и}$ за 100%. Тогда остальным значениям Φ_i можно противопоставить их процентное отношение к $\Phi_{и}$ по формуле

$$\alpha_i=100\Phi_i/\Phi_{и}. \qquad (2.26)$$

Если положить, что в данный момент $\Phi_s(t)=\Phi_i$, то выражение (2.26) характеризует уровень качества функционирования системы в данный момент.

Как уже отмечалось, случайный процесс $\Phi[\bar{S}(t)]$ можно рассматривать как совокупность его реализаций. Очевидно, каждой реализации $\Phi_s(t)$ процесса функционирования системы в заданном интервале времени $t_1\leqslant t\leqslant t_2$ можно противопоставить числовую оценку $Э_s[t_1, t_2]$ этой реализации. Эта оценка характеризует качество и полноту выполнения задачи в интервале времени $t_1\leqslant t\leqslant t_2$ при условии, что наблюдалась именно данная реализация функционирования системы, и называется *выходным эффектом системы*, т. е. положительным результатом, полученным при эксплуатации системы за данный интервал времени. В гл. 1 указывалось, что выходной эффект является показателем эффективности функционирования системы.

Таким образом, выходной эффект системы $Э_s[t_1, t_2]$ — это функционал от реализации процесса функционирования ее в данном интервале времени:

$$Э_s[t_1, t_2]=Э\{\Phi_s(t), \ t_1\leqslant t\leqslant t_2\}. \qquad (2.27)$$

Показатель выходного эффекта системы в интервале времени $t_1\leqslant t\leqslant t_2$ — средний ее эффект, представляющий собой математическое ожидание выходного эффекта системы

$$\bar{Э}[t_1, t_2]=M\{Э_s[t_1, t_2]\}=M\{Э[\Phi_s(t), \quad t_1\leqslant t\leqslant t_2]\}. \qquad (2.28)$$

В выражении (2.28) имеется в виду среднее по множеству реализаций процесса функционирования системы.

В [19] аналогично показателю (2.17) используется *относительный средний эффект системы* как отношение среднего эффекта данной си-

стемы к среднему эффекту такой же идеальной (абсолютно безотказной) системы в данном интервале времени

$$r[t_1, t_2] = \overline{Э}[t_1, t_2]/\overline{Э}_{ид}[t_1, t_2], \qquad (2.29)$$

где $Э_{ид}[t_1, t_2]$ — показатель выходного эффекта идеальной системы в интервале времени $t_1 \leqslant t \leqslant t_2$.

Величина $\overline{Э}_{ид}[t_1, t_2]$ есть условное математическое ожидание выходного эффекта $Э_s[t_1, t_2]$ от эксплуатации системы при условии, что в течение всего интервала времени $t_1 \leqslant t \leqslant t_2$ система находится в исправном состоянии $\overline{S}_и(t)$:

$$\overline{Э}_{ид}[t_1, t_2] = M\{Э_s[t_1, t_2]/\overline{S}_и(t), \quad t_1 \leqslant t \leqslant t_2\}. \qquad (2.30)$$

Показатель (2.29) дает интервальную оценку надежности сложной системы.

Другим показателем, позволяющим получить интервальную оценку надежности системы, является *интегральный относительный показатель* качества функционирования. Он представляет собой относительный показатель качества функционирования системы, усредненный на заданном интервале времени,

$$\rho[t_1, t_2] = \int_{t_1}^{t_2} R(t)\, dB(t), \qquad (2.31)$$

где $B(t)$ — некоторая «весовая» функция, учитывающая «полезность» системы в зависимости от времени; $R(t)$ — уровень качества функционирования системы. Если качество функционирования системы оценивается ее производительностью (например, количество информации, переданной в единицу времени), то за «весовую» функцию можно принять время

$$B(t) \equiv t. \qquad (2.32)$$

При учете выражения (2.32) из формулы (2.31) видно, что величина $\rho[t_1, t_2]$ оценивается площадью под графиком кривой мгновенной оценки надежности системы $R(t)$. В этом проявляется аналогия между показателями надежности $R(t)$, $\rho[t_1, t_2]$ для сложных систем и показателями надежности $P(t)$, T для простых систем.

Для подтверждения данного положения рассмотрим выражение вероятности работы системы в заданном интервале времени на уровне качества функционирования не ниже α_i. Вероятность $P_{\alpha i}[t_1, t_2]$ называют вероятностью альфа-процентного функционирования, которую можно получить из выражения (2.26) как процентные отношения уровней α_i от $\Phi_и(t)$.

Надежность системы характеризуется вектором вероятностей альфа-процентного функционирования для различных значений α_i:

$$\overline{P}_\alpha[t_1, t_2] = \begin{vmatrix} P_{\alpha 0}[t_1, t_2] \\ P_{\alpha 1}[t_1, t_2] \\ \vdots \\ P_{\alpha j}[t_1, t_2] \end{vmatrix}.$$

Вероятность $P_{\alpha i}[t_1, t_2]$ сложных систем является аналогом вероятности безотказной работы простых систем.

Кроме того, как следует из выражений (2.31) и (2.32), показатель $\rho[t_1, t_2]$ имеет размерность времени. Тогда аналогично вероятности альфа-процентного функционирования можно рассматривать среднее время альфа-процентного функционирования, т. е. среднее время работы системы на уровнях качества функционирования не ниже α_i. Для простых же систем аналогом является наработка до отказа.

Таким образом, показатели надежности сложных систем — это отношение показателей качества или эффективности функционирования реальной и идеальной системы, определяемые по формулам (2.17), (2.29), (2.31). Обобщенное выражение для этих формул было дано в § 1.5 в виде (1.3).

Пример 2.2. Определить показатели надежности автономного регистратора, который должен непрерывно выполнять задачу по регистрации информации в течение интервала времени $[0, t_{\text{пр}}]$. Структурная схема регистратора приведена на рис. 2.2. Информация с выхода измерительных преобразователей в виде напряжения u_1—u_i поступает на вход аналогового цифрового преобразователя *1*, который преобразует напряжение в двоичный код. Информация в двоичном коде регистрируется магнитными запоминающими устройствами (*2*, *3*). Причем нечетные каналы регистрируются устройством *2*, а четные — устройством *3*. Информативность каждого запоминающего устройства одинакова и равна $10 \cdot 10^3$ бит/с.

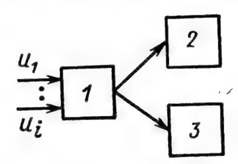


Рис. 2.2. Структурная схема автономного регистратора.

При решении учитываем, что:

1. Автономный регистратор — однофункциональная система, состоящая из трех простых устройств, которые будем рассматривать как простые элементы сложной системы. Число элементов $N=3$.

2. Каждый элемент системы может находиться в двух состояниях:

$$S_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й элемент работоспособен,} \\ 0, & \text{если } i\text{-й элемент неработоспособен.} \end{cases}$$

3. Переход системы из одного состояния в другое состояние является марковским процессом.

4. Автономный регистратор относится к классу невосстанавливаемых систем.

5. Возникшие отказы в каждом элементе характеризуются экспоненциальным законом с постоянной интенсивностью:

— аналогового цифрового преобразователя $\lambda_1=0{,}05$ 1/ч,

— магнитных запоминающих устройств $\lambda_2=\lambda_3=0{,}1$ 1/ч.

Решение. 1. Состояние системы описывается 4-мерным вектором $\bar{S}(t)$:

$$\bar{S}_{\text{IV}}(t) = \begin{vmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ S_3(t) \\ S_4(t) \end{vmatrix}.$$

Компоненты $S_1(t)$, $S_2(t)$, $S_3(t)$ описывают состояние элементов системы и могут принимать значение 0 (неработоспособен) и 1 (работоспособен). Компонента $S_4(t)$ учитывает потребность в выполнении задачи и в рассматриваемом примере равна единице в течение всего интервала времени. Состояние данной системы выразим 3-мерным вектором

$$\bar{S}_{\text{III}}(t) = \begin{vmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ S_3(t) \end{vmatrix},$$

каждая компонента которого описывает состояние одного из элементов системы, а $S_4(t)=1$.

Состояние $\bar{S}_{\text{III}}$ системы можно интерпретировать как двоичное число. Тогда удобно выписать все возможные состояния системы в порядке следования натурального ряда чисел в двоичной системе счисления, транспонировав

j	$\{N_j\}$	Φ_j, бит/с	$\bar{S}^{т}$	Примечание
0	1,2,3	$20\cdot10^3$	$S^{т}_7=111$	Работоспособные состояния системы
1	1,2	$10\cdot10^3$	$S^{т}_6=110$	
2	1,3	$10\cdot10^3$	$S^{т}_5=101$	
3	2,3	0	$S^{т}_3=011$	Состояния полного отказа системы (неработоспособные)
4	1	0	$S^{т}_4=100$	
5	2	0	$S^{т}_2=010$	
6	3	0	$S^{т}_1=001$	

вектор-столбец $\bar{S}^{III}$ в вектор-строку $\bar{S}^{т}$:

$$S_0^{т}=(000) \qquad S_4^{т}=(100)$$

$$S_1^{т}=(001) \qquad S_5^{т}=(101)$$

$$S_2^{т}=(010) \qquad S_6^{т}=(110)$$

$$S_3^{т}=(011) \qquad S_7^{т}=(111).$$

2. Каждому состоянию системы противопоставим характеристику качества функционирования $\Phi_s(t)$ системы в этом состоянии. Способ j выполнения задачи определяется набором $\{N_j\}$ элементов системы, одновременно используемых для этой цели.

За характеристику качества функционирования примем информативность системы, т. е. количество информации, зарегистрированное в единицу времени. При исправной работе системы (состояние $S^{т}_7$) характеристика качества функционирования $\Phi_0=20\cdot10^3$ бит/с, а при отказе одного из магнитных запоминающих устройств $\Phi_1=\Phi_2=10\times\times10^3$ бит/с. При полном отказе системы $\Phi_3=\Phi_4=\Phi_5=\Phi_6=0$.

Все возможные способы j выполнения задачи, включая различные состояния полного отказа системы, и соответствующие этим способам наборы $\{N_j\}$ элементов системы представлены в таблице. Здесь же определены характеристики качества функционирования системы для различных способов выполнения задачи.

3. Определим вероятности $P_i(t)$ состояний системы в любой момент времени. Состояния системы и возможные переходы системы из одного состояния в другое можно изобразить с помощью графа состояний (рис. 2.3). Переход системы из одного состояния в другое характеризуется отказом только одного элемента. Величина $\lambda_i dt$ является вероятностью перехода системы из одного состояния в другое за промежуток времени dt. На рис. 2.3 отметим против каждой стрелки интенсивность отказов, приводящих систему из одного состояния в другое, и пронумеруем все состояния в следующем порядке: 0, 1, 2,..., 6. В данном примере такая нумерация совпадает с нумерацией способов выполнения задачи $j=0, 1, 2,..., 6$. Такой граф называется размеченным.

Так как процесс изменения состояний системы описывается однородным марковским процессом с непрерывным временем и конечным числом дискретных состояний, то вероятности состояний определяются из решения системы линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами [19]

$$dP_i(t)/dt=\sum_{j=0}^{6}P_j(t)\,a_{ij},$$

где

$$a_{ij}=\begin{cases}\lambda_{ij}, & j\neq i,\\ -\sum\limits_{j\neq i}\lambda_{ij}, & j=i\end{cases}$$ — матрица интенсивностей переходов.

В рассматриваемом примере матрица интенсивностей переходов имеет следующий вид:

$\bar{S}^{т}$	0	1	2	3	4	5	6
0	$-(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)$	λ_3	λ_2	λ_1	0	0	0
1	0	$-(\lambda_1+\lambda_2)$	0	0	λ_2	λ_1	0
2	0	0	$-(\lambda_1+\lambda_3)$	0	λ_3	0	λ_1
3	0	0	0	$-(\lambda_2+\lambda_3)$	0	λ_3	λ_2
4	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0	1

Тогда система дифференциальных уравнений примет вид

$$P'_0(t) = -(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)P_0(t),$$
$$P'_1(t) = \lambda_3 P_0(t) - (\lambda_1+\lambda_2)P_1(t),$$
$$P'_2(t) = \lambda_2 P_0(t) - (\lambda_1+\lambda_3)P_2(t),$$
$$P'_3(t) = \lambda_1 P_0(t) - (\lambda_2+\lambda_3)P_3(t),$$
$$P'_4(t) = \lambda_2 P_1(t) + \lambda_3 P_2(t),$$
$$P'_5(t) = \lambda_1 P_1(t) + \lambda_3 P_3(t),$$
$$P'_6(t) = \lambda_1 P_2(t) + \lambda_2 P_3(t).$$

Зададимся следующими начальными условиями для вероятностей $P_i(0)$: $P_0(0)=1$, $P_1(0)=P_2(0)=\ldots=P_6(0)=0$.

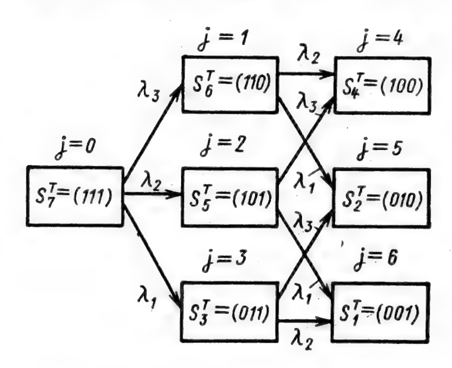


Рис. 2.3. Граф состояний системы.

Решая систему уравнений при таких начальных условиях, находим вероятности $P_i(t)$ состояний системы в любой момент времени

$$P_0(t) = \exp[-(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)t],$$
$$P_1(t) = [1-\exp(-\lambda_3 t)]\exp[-(\lambda_1+\lambda_2)t],$$
$$P_2(t) = [1-\exp(-\lambda_2 t)]\exp[-(\lambda_1+\lambda_3)t],$$
$$P_3(t) = [1-\exp(-\lambda_1 t)]\exp[-(\lambda_2-\lambda_3)t],$$
$$P_4(t) = [1-\exp(-\lambda_1 t)][1-\exp(-\lambda_2 t)]\exp(-\lambda_3 t),$$
$$P_5(t) = [1-\exp(-\lambda_1 t)][1-\exp(-\lambda_3 t)]\exp(-\lambda_2 t),$$
$$P_6(t) = [1-\exp(-\lambda_2 t)][1-\exp(-\lambda_3 t)]\exp(-\lambda_1 t).$$

4. Используя выражение (2.19) и данные таблицы, приведенные на с. 27, определим показатель качества функционирования системы

$$\Phi(t) = M\{\Phi_s(t)\} = \sum_{j=0}^{6}\Phi_j P_j(t) =$$
$$= \Phi_0 P_0(t) + \Phi_1 P_1(t) + \Phi_2 P_2(t) =$$
$$= 10\cdot 10^3\{2\exp[-(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)t] +$$
$$+ [1-\exp(-\lambda_3 t)]\exp[-(\lambda_1+\lambda_2)t] +$$
$$+ [1-\exp(-\lambda_2 t)]\exp[-(\lambda_1+\lambda_3)t]\},$$

бит/с.

При $\lambda_2=\lambda_3$

$$\Phi(t) = 20\cdot 10^3\exp[-(\lambda_1+\lambda_2)t],$$

бит/с.

5. Используя выражение (2.17), определим относительный показатель качества функционирования системы (при $\lambda_2=\lambda_3$)

$$R(t) = \Phi(t)/\Phi_0 = P_0(t) + P_1(t)\,\Phi_1/\Phi_0 + P_2(t)\,\Phi_2/\Phi_0 = \exp[-(\lambda_1+\lambda_2)t].$$

6. Используя выражение (2.29), определим относительный средний эффект системы в интервале времени $0 \leqslant t \leqslant t_{пр}$

$$r[0,\ t_{пр}] = \overline{Э}[0,\ t_{пр}]/\overline{Э}_{ид}[0,\ t_{пр}] =$$
$$= \frac{1}{\Phi_0 t_{пр}}\int_0^{t_{пр}}\Phi(t)\,dt = \frac{1}{t_{пр}}\int_0^{t_{пр}}R(t)\,dt =$$
$$= \frac{1-\exp[1-(\lambda_1+\lambda_2)t_{пр}]}{(\lambda_1+\lambda_2)t_{пр}}.$$

7. При заданных значениях λ_i и $t_{пр}=1$ ч получим

$$\Phi(t) = 20\cdot 10^3\cdot 0{,}86 = 17{,}2\cdot 10^3 \text{ бит/с};$$
$$R(t) = 0{,}86;\quad r[0,\ t_{пр}] = 0{,}933.$$

В заключение следует отметить, что понятия качества и эффективности не зависят от понятия надежности. Однако, если составные части (элементы) системы могут отказывать, то это существенно сказывается на качестве ее функционирования и выходном эффекте. В этих условиях под надежностью сложной системы следует понимать стабильность показателей качества и эффективности функционирования. Стабильность этих показателей влияет на общую оценку функционирования системы, зависит от надежности элементов и характеризует ее надежность в целом [19].

2.3. ВЛИЯНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА НА ОЦЕНКУ НАДЕЖНОСТИ

Как уже отмечалось, при оценке надежности системы «человек — техника» необходимо учитывать как надежность системы, так и деятельность обслуживающего персонала. Человек принимает участие не только в проведении технического обслуживания и ремонтов, но и участвует в выполнении поставленной задачи в период применения. Степень участия человека в этом процессе для различной аппаратуры неодинакова. В одном случае человек, не дублируя аппаратуру, самостоятельно решает ту часть задачи, которая не выполняется техникой. В другом — контролирует правильность функционирования аппаратуры и, если работоспособность аппаратуры нарушается, активно участвует в выполнении задачи. В последнем случае человек выполняет функции резерва аппаратуры. Тогда вероятность безотказной работы системы «человек — техника» будет определяться соотношением [15]

$$P_{\text{счт}} = P_{\text{пр}} P_{\text{ч}} + Q_{\text{пр}} P_{\text{ч}} E_{\text{с}} + P_{\text{пр}} Q_{\text{ч}} E_{\text{ч}} + Q_{\text{пр}} Q_{\text{ч}} E_{\text{чт}}, \tag{2.33}$$

где $P_{\text{по}}$ — вероятность безотказной работы аппаратуры при выполнении задачи; $P_{\text{ч}}$ — вероятность безотказной работы оператора при выполнении задачи; $Q_{\text{пр}} = 1 - P_{\text{пр}}$ — вероятность возникновения отказа аппаратуры при выполнении задачи; $Q_{\text{ч}} = 1 - P_{\text{ч}}$ — вероятность нарушения работоспособности оператора при выполнении задачи; $E_{\text{с}}$ — показатель относительной эффективности состояния системы «человек — техника», когда неработоспособна аппаратура; $E_{\text{ч}}$ — показатель относительной эффективности состояния системы «человек — техника», когда неработоспособен оператор; $E_{\text{чт}}$ — показатель относительной эффективности состояния системы «человек — техника», когда неработоспособны и аппаратура, и оператор.

Показатели относительной эффективности состояния системы «человек — техника» определяются выражениями, аналогичными выражению (1.3) для соответствующего состояния: работоспособна или неработоспособна. Предположение относительно двух состояний работоспособности, безусловно является упрощенным, так как таких состояний у оператора может быть множество, каждому из которых соответствует определенная эффективность.

Вероятность безотказной работы оператора при выполнении работ на РТС определяется по методике, изложенной в § 11.4.

Важным показателем эффективности системы «человек — техника» является время решения задачи. Среднее время решения задачи можно определить из выражения [15]

$$T_{\text{чт}} = P_{\text{пр}} T_{\text{рзт}} + Q_{\text{пр}} T_{\text{рзч}},$$

где $T_{\text{рзт}}$ — время решения задачи исправной аппаратуры; $T_{\text{рзч}}$ — среднее время решения задачи оператором.

Из этого выражения видно, что среднее время решения задачи системой «человек — техника» зависит как от времени решения задачи исправной техники, так и от времени решения задачи оператором. При этом обычно $T_{\text{рзч}} \gg T_{\text{рзт}}$. Но так как вероятность безотказной работы техники при выполнении задачи $P_{\text{пр}}$ близка к единице, то оба слагаемых в правой части выражения примерно одинаковы по величине. Если же по каким-либо причинам надежность аппаратуры уменьшится, то для успешного решения задачи оператор должен чаще подключаться

к решению задачи. Это приводит к увеличению среднего времени решения задачи системой «человек — техника».

Влияние действий обслуживающего персонала на надежность системы и среднее время решения задачи такой системой учитывается при совместной оценке надежности системы «человек — техника» в режиме применения.

2.4. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Надежность систем в процессе эксплуатации зависит от субъективных и объективных факторов. К субъективным факторам относят влияние деятельности обслуживающего персонала на надежность систем. Известно, что по вине обслуживающего персонала происходит 20...30% отказов аппаратуры [24, 31]. Среди субъективных факторов наибольшее значение имеет квалификация обслуживающего персонала, строгое выполнение сроков и объемов технического обслуживания и ремонтов, соблюдение правил эксплуатации и мер безопасности.

К объективным относят факторы, которые подразделяются на внешние, приводящие к отказам по не зависящим от аппаратуры причинам, и внутренние, приводящие к отказам по зависящим от самой аппаратуры и входящих в нее элементов причинам. На рис. 2.4 приведена классификация объективных эксплуатационных факторов [16].

Рассмотрим влияние факторов, указанных на рис. 2.4, на надежность РТС в процессе эксплуатации.

Климатические воздействия. Нормальные климатические условия характеризуются температурой 20±5°C, относительной влажностью воздуха 65±15%, атмосферным давлением 96...104 кПа (720...780 мм рт. ст.) и отсутствием загрязненности воздуха.

Анализ климатических условий показывает, что температура воздуха может колебаться от —70 до +70°C [3, 16].

Отклонение температуры от нормальной приводит к изменению физических и механических свойств материалов, из которых изготовлены элементы радиотехнических систем. Эти изменения вызывают отклонения параметров элементов от номинальных значений и технических характеристик аппаратуры в целом. При восстановлении нормальной температуры отклонения параметров самоликвидируются или остаются. Колебания температуры ускоряют процесс старения элементов, увеличивая интенсивность их отказов.

При пониженной температуре

— изменяются свойства всех диэлектриков, ухудшаются или улучшаются отдельные электрические характеристики комплектующих элементов (например, емкость электролитических конденсаторов при температуре —40°C па-

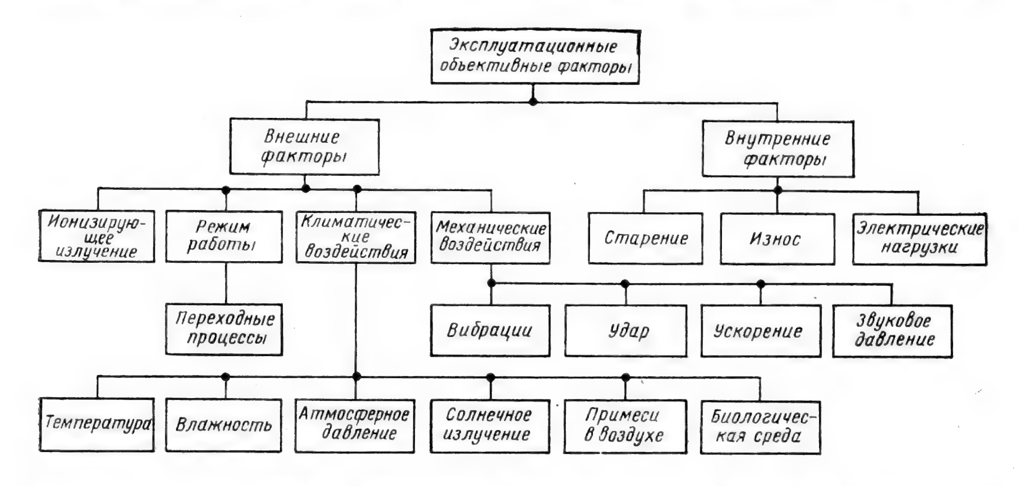


Рис. 2.4. Классификация объективных эксплуатационных факторов, действующих на системы.

дает до нуля, емкость конденсаторов из металлизированной бумаги при температуре около —65°С уменьшается на 12...14%, а у некоторых слюдяных конденсаторов наоборот возрастает от 60 до 300% в зависимости от размеров [16];

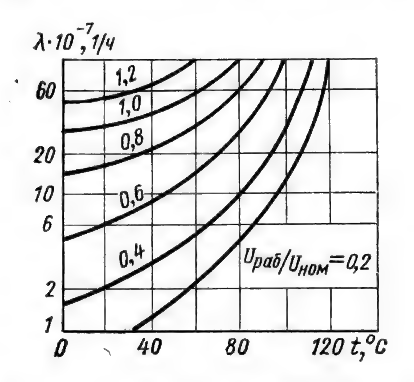


Рис. 2.5. Зависимость интенсивности отказов от температуры и коэффициента нагрузки для керамических конденсаторов.

— изменяются характеристики механической прочности материалов (например, сложные и волокнистые фенопластики, пластмасса на основе эфиров целлюлозы снижают свою прочность на удар, но одновременно увеличивается на 10...30% их прочность на разрыв, изгиб и сжатие, а прочность на разрыв оргстекла возрастает в два раза);

— ухудшаются условия работы трущихся частей устройств, залитых смазкой, которая при понижении температуры становится густой, затрудняется нормальная работа механизма и может произойти заедание или заклинивание;

— снижается качество паек радиодеталей систем (вследствие того, что входящее в состав припоя белое олово при температуре ниже —13°С превращается в быстроразрушающееся серое).

При повышенной температуре

— изменяются основные электрические характеристики электроизолирующих материалов (диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь, величина пробивного напряжения, приложенного к диэлектрику и т. п.);

— снижается износоустойчивость изоляции (при повышении температуры изоляции из органического диэлектрика на 10...12°С вдвое увеличивается степень теплового износа и соответственно в два раза сокращается срок службы изоляции);

— изменяются физические свойства металлов (увеличивается их сопротивление, изменяется величина магнитного потока магнита, изменяются размеры деталей, уменьшаются прочность и упругость);

— увеличивается интенсивность отказов комплектующих элементов.

На рис. 2.5—2.7 приведены зависимости интенсивности отказов конден-

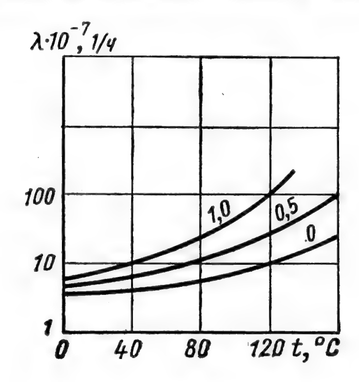


Рис. 2.6. Зависимость интенсивности отказов от температуры и рассеиваемой мощности для углеродистых резисторов.

саторов, углеродистых резисторов, электровакуумных приборов и полупроводниковых диодов от температуры [16]. Рисунок 2.5 соответствует случаю, когда температура конденсатора принимается равной температуре окружающей среды. Кривые рис. 2.5 учитывают действующее на конденсатор рабочее постоянное или эффективное напряжение, а рис. 2.6 — рассеиваемую резистором электрическую мощность. На

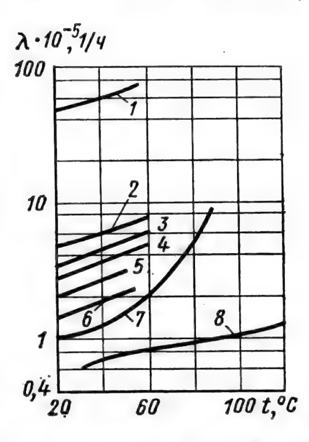


Рис. 2.7. Зависимость средней интенсивности отказов электровакуумных приборов и полупроводниковых диодов от температуры при номинальной электрической нагрузке.

рис. 2.7 показана зависимость средней интенсивности отказов для магнетрона *1*, клистрона *2*, тиратрона *3*, тетрода и пентода *4*, электронно-лучевой трубки *5*, диода и триода *6*, германиевого *7* и кремниевого 8 диодов. Из рис. 2.7 видно, что полупроводниковые приборы очень сильно подвержены воздействию тепла. При увеличении температуры они меняют свои параметры, а при сильном нагреве могут выходить из строя.

Влажность и атмосферные осадки. Влажность является одним из факторов, отрицательно действующим на на РТС. Воздействие влаги на комплектующие элементы аппаратуры, как правило, обратимо, но при прохождении через них тока это воздействие становится необратимым.

При повышенной влажности воздуха

— ускоряется коррозия металлов и сплавов, тем самым снижаются прочностные характеристики деталей и может произойти нарушение контактных соединений и обрывы проводников (при относительной влажности воздуха 80...100% срок службы деталей, изготовленных из черных металлов или имеющих в своем составе металлические элементы, снижается в 2...2,5 раза, а деталей из алюминиевых сплавов — в 2 раза);

— снижаются электроизоляционные свойства некоторых пластмасс и сопротивление изоляции кабелей (гетинакс, текстолит, целлюлоза и пресспорошки при увлажнении набухают, а их удельное объемное сопротивление уменьшается, растут диэлектрические потери);

— ухудшаются адгезионные и объемные свойства некоторых смазок нефтяного происхождения;

— ускоряются разрушения лакокрасочных защитных покрытий;

— нарушается герметизация заливок;

— увеличиваются потери в контурных катушках дросселей и трансформаторов;

— разрушается структура резисторов (увеличивается действительное значение сопротивления и резко снижается их влагостойкость).

Пониженная влажность воздуха (менее 30%) ухудшает эластичность и снижает прочность ряда эмалевых и лакокрасочных покрытий. Она способствует усыханию изоляционных материалов (лент, пленок) и ухудшению их механических свойств.

Атмосферные осадки всех видов способствуют возрастанию влажности. Обледенение воздействует на наружные устройства РТС, приводя к ухудшению работы всей аппаратуры, а в ряде случаев и к ее механическому разрушению. Снег особенно опасен в арктических условиях, когда в результате ветра он забивается во все щели, затрудняя работу или приводя к отказу РТС.

Дождь и ветер замедляют процесс коррозии, а туман, испарения, таяние загрязненного снега ускоряют этот процесс. Дождь очищает поверхность от загрязнения, а туман способствует осаждению грязи на поверхность металла.

Атмосферное давление. На поверхности Земли колебания атмосферного давления незначительны, поэтому они существенного влияния на РТС не оказывают. Однако РЭА широко используется на летательных аппаратах, в высокогорных районах, в подземных и подводных условиях, где атмосферное давление значительно отличается от нормального.

Влияние пониженного атмосферного давления на надежность РТС может быть непосредственное и косвенное. При непосредственном влиянии изменяются параметры комплектующих элементов. В частности, изменяются емкость и допустимое рабочее напряжение конденсаторов с воздушным диэлектриком, уменьшается величина пробивного напряжения в изоляторах, волноводах, разрядниках и между проводниками в монтаже. Так, например, при изменении высоты от 1 до 1,6 км величина пробивного напряжения уменьшается в четыре раза. На высотах выше 2 км могут появляться тихие или скользящие искровые разряды в негерметизированных высоковольтных выпрямителях, антенно-фидерных устройствах и т. п. На больших высотах имеется опасность возникновения газовых пробоев, образующихся вследствие плазменного состояния атмосферы от воздействия ионизации и высокочастотного поля. Такой пробой начинается с появлением коронного разряда, который может возникнуть при более низком напряжении, чем напряжение перекрытия. Это приводит к изменению диаграммы направленности антенны, уменьшению излучаемой мощности, искажениям формы импульсов импульсных СВЧ передатчиков.

Косвенное влияние пониженного давления выражается в ухудшении условий воздушного охлаждения РТС вследствие уменьшения плотности воздуха. Это приводит к перегреву аппаратуры, а следовательно, и увеличению вероятности ее отказа.

Солнечное излучение. Воздействие солнечного излучения на радиотехнические системы определяется диапазоном

электромагнитных волн (видимый свет, ультрафиолетовые и инфракрасные волны), которые достигают ее поверхности.

Наибольшее действие видимого света проявляется в химическом разложении некоторых видов органических пластмасс, красителей, каучука, тканей и изделий из них. При наличии видимого излучения солнца и электрических разрядов из кислорода воздуха образуется озон, воздействие которого на естественные и нитральные каучуки приводят к их разрушению. На поверхности натуральной резины при этом образуется корка.

Влияние ультрафиолетового излучения сводится в основном к количественным изменениям большинства органических материалов (каучук, пластики и т. д.), к частичному химическому разложению полимеров, содержащих хлор (полихлорвинил, поливинилденхлорид и др.), к изменению органической связки и цвета некоторых термореактивных пластмасс, к изменению структуры поверхностного слоя древесины. Ультрафиолетовое излучение является катализатором реакции окисления полиэтилена, полистирола и других полярных диэлектриков.

Совместное воздействие видимого и ультрафиолетового излучения (фотохимическое воздействие) приводит к выцветанию и разрушению лакокрасочных покрытий.

Инфракрасное излучение вызывает увеличение температуры материалов со всеми вытекающими последствиями.

Примеси в воздухе. Надежность РТС зависит от чистоты воздуха, в котором могут содержаться вредные примеси (пыль, песок и т. п.).

Пыль, попадая внутрь шкафов, стоек, корпусов радиотехнических систем, приводит к изменению параметров комплектующих элементов (увеличивается емкость конденсаторов с воздушным диэлектриком, снижается величина сопротивления изоляции и т. п.), к появлению тресков и шумов в радиоприемниках и усилителях за счет образования коронного разряда, к увлажнению радиодеталей (см. влияние влажности).

В водухе имеются и другие вредные примеси. Наиболее опасными из них являются агрессивные химические газы (сернистый газ, хлор и т. п.), воздействие которых приводит к коррозии некоторых материалов, нарушает нормальную структуру и ухудшает их свойства.

Биологическая среда. Влияние биологической среды на надежность РТС заключается в поражении ее плесенью, насекомыми и грызунами.

Под действием плесени наиболее сильному разрушению подвергаются:

— изделия из древесины. Происходит изменение плотности, удельного веса, цвета, механической прочности. Изделия приобретают специфический «грибной» запах;

— изделия из натуральных волокнистых материалов (текстиль, хлопок, пряжа, конопля, джут, шерсть);

— лакокрасочные покрытия металлических и других изделий. Тем самым ускоряется процесс коррозии за счет выделения уксусной, лимонной, щавелевой и других кислот;

— изделия из пластмасс, наполнители и пластификаторы которых подьержены действию плесени (поливинилацетат, глифталевая смола, натуральный каучук, производные лавровой и фосфористой кислот, естественные масла и др.). Повышается хрупкость изделий и изменяются их электрические свойства;

— стеклянные призмы и линзы. Их поверхности при наличии питательной среды мутнеют, появляются пятна, вызванные выщелачиванием стекла;

— изделия из натурального и синтетического каучука при непосредственном контакте резины с водой или землей;

— изделия из кожи. Они теряют свою эластичность.

В РТС остатки канифоли в местах пайки являются хорошей питательной средой для образования и роста плесени. Появление плесени снижает сопротивление изоляции, ускоряет процесс коррозии металлов, разрушает защитные покрытия, нарушает контакты, приводит к замыканию, способствует пробоям изоляции.

Для радиотехнических систем опасны такие насекомые-вредители, как термиты, некоторые типы жуков (кожеед, мебельный и хлебный точильщики и др.), моли разных видов (платяная, меховая, ковровая и др.), красные муравьи, черви («сверлянки», корабельные), тараканы. Термиты съедают древесину, пластмассы на основе целлюлозы, кожу, повреждают кабели и провода с изоляцией из органических материалов. Иногда термиты повреждают даже асфальт. Выделения, отлагаемые термитами на токонесущих проводах радиоаппаратуры, вызывают утечку тока и короткие замыкания. Жуки повреждают кожу, брезент, древесину и другие материалы. Моли так же, как и жуки, поражают войлок, фетр, шерстяные и суконные ткани. Красных муравьев привлекают материалы, содер-

жащие компоненты сладкого вкуса (например, эксцельсировые трубки). Зарегистрированы случаи, когда тараканы портили изоляцию, выводя РТС из строя.

Значительные повреждения радиотехническим средствам могут нанести различные грызуны (крысы, белки, полевые мыши, суслики и т. д.). Они повреждают кабели, изоляцию электропроводки, некоторые виды пластмасс, резиновые, кожаные и другие изделия.

Число отказов радиотехнических систем при воздействии биологической среды сравнительно невелико и по некоторым данным составляет не более 0,5% [33].

Ионизирующее излучение [16, 33]. На надежность РТС в процессе их эксплуатации могут влиять различные ионизирующие излучения, которые включают как естественный радиационный фон (см. ГОСТ 15484—70), так и излучения, возникающие в результате ядерных реакций (в реакторе, при атомном или термоядерном взрывах). Степень воздействия ионизирующего излучения на РТС зависит от вида и дозы излучения, мощности дозы излучения, распределения энергии излучения по спектру, природы облучаемого вещества и условий, в которых происходит облучение.

Действие ионизирующего излучения на материалы, применяемые для изготовления РТС, приводит к обратимым (временным) и необратимым (остаточным) изменениям их физических, химических и электрических параметров. Обратимые изменения могут исчезать одновременно с моментом окончания облучения или оставаться в течение некоторого времени (период восстановления) после облучения. Эти изменения обычно вызываются гамма-излучением. Необратимые изменения приводят к нарушениям структуры вещества. Эти изменения в основном зависят от величины дозы и спектра излучения.

При воздействии ионизирующего излучения происходит

— изменение свойств металлов (твердость, прочность, электрическое сопротивление);

— размягчение бутилкаучука;

— уменьшение эластичности натурального каучука;

— изменение свойств полистирола и стеклоткани, пропитанной термореактивными смолами;

— уменьшение механической прочности большинства диэлектриков;

— изменение свойств полупроводниковых материалов.

В последнем случае транзисторы и полупроводниковые диоды ведут себя в схеме как дополнительные миниатюрные источники мощности, электронно-дырочные пары представляют собой избыточные носители и образуют первичный ионизирующий ток в диффузионных переходах. Появление последнего вызывает увеличение рабочих токов транзисторов, что нарушает работу схемы за счет появления паразитных сигналов и увеличивает вероятность пробоя перехода из-за насыщения транзистора, появляется обратная связь, приводящая к возникновению паразитной генерации.

При воздействии ионизирующего излучения на интегральные полупроводниковые схемы возможны случаи перегрева схемы за счет увеличения переходных токов. Установлено, что при облучении потоком $10^{10} \dots 10^{12}$ $n/\text{см}^2$ (n — количество нейтронов) обычные полупроводниковые приборы начинают выходить из строя, а при облучении нейтронным потоком свыше 10^{15} $n/\text{см}^2$ происходят необратимые изменения в резисторах [16]. Небольшие дозы ионизирующего излучения в значительной мере влияют на проводимость конденсаторов. Причем возрастание проводимости происходит с той же скоростью, с какой увеличивается интенсивность излучения. После окончания излучения проводимость конденсаторов восстанавливается в течение не более 1 с.

Механические воздействия. В зависимости от назначения и места установки радиотехнические системы могут подвергаться различным механическим воздействиям, к которым относятся удары, вибрации, ускорения, рабочие усилия и звуковые давления.

Вибрации могут появиться при возвратно-поступательном или вращательном движении несбалансированных масс, из-за выхлопа газа в двигателях внутреннего сгорания, в результате работы реактивного двигателя на самолете, ракете, космическом корабле, за счет аэродинамических эффектов при движении летательных аппаратов в атмосфере Земли и т. д. Характеристики возможных механических воздействий на РТС в зависимости от места ее установки приведены в таблице [16].

Воздействие вибраций приводит к преждевременному изнашиванию элементов радиоаппаратуры, к появлению в них усталостных явлений и к частичному или полному разрушению. Последнее обычно происходит при совпадении частот вибрации с собственными резонансными частотами элементов. Вибрация может приводить к обрыву в местах их крепления, нарушению герметизации, возникновению коротких замыканий. Под действием вибрации может

Вид аппаратуры	Механические воздействия		
	Частота вибрации, Гц	Максимальная амплитуда, мм	Ускорение при ударах, g
Наземная, для транспортных средств:			
в кузовах автомашин	0...80	±1,0...2,5	до 10
на тракторах колесного типа	8...15	—	50 в течение 10...50 мс
на танках	20...2000	—	5 при встрече с твердым препятствием
Наземная, переносная, рассчитанная на индивидуальную переноску людьми и перевозку всеми видами транспорта	10...120	±0,15...2,5	100...200 в случае падения с высоты 1,3 м
Самолетная, для работы на транспортных самолетах и бомбардировщиках	10...500 от винтового двигателя	±0,75 на в. ч. ±3,8 на н. ч.	5 15
Корабельная, для работы:			
на кораблях большого тоннажа	0...25	±1	15
на кораблях малого тоннажа	10...300	±1	до 120
Ракетная:			
на участке разгона	30...500	—	до 40
в полете	30...5 000	—	5...30
Радиовзрыватели при встрече с преградой	—	—	20 000

нарушаться первоначальная настройка регулируемых радиоэлементов (переменных резисторов, подстроечных конденсаторов). В электровакуумных приборах может наблюдаться повреждение нитей накала и подогревателей, изменение междуэлектронных расстояний, нарушение контактов и паек, увеличение газовыделения, рост виброшумов и т. д.

При ударах, которые связаны с резким и быстрым изменением ускорения, скорости или направления перемещения, воможны случаи, когда возникающие нагрузки превысят допустимые безопасные уровни, что приведет к отказу РТС. Примеры ударных нагрузок на радиоаппаратуру в процессе эксплуатации приведены в предыдущей таблице.

Ударные нагрузки возникают при транспортировании РТС различными видами транспорта. Значения частот вибраций и перегрузок при различных видах перевозок даны в таблице [24].

Вид перевозок	Вибрация, Гц	Перегрузки, g
Морские	0...30	1
Железнодорожные	1,5...400	2
Автомобильные	0...200	4...5
Авиационные	0...300	20

В процессе эксплуатации обслуживающий персонал при выполнении различных операций прикладывает определенные физические усилия, которые в ряде случаев при неумелом или небрежном обращении могут привести к повреждениям и отказам радиоаппаратуры (излишние усилия при пользовании органами управления, настройки и регулировки, при смене электронных ламп, при включении или отключении контактных разъемов и т. п.).

На РТС, расположенные вблизи работающих турбореактивных и реактивных силовых установок самолетов, ракет и некоторых космических аппаратов, воздействует энергия колебаний звуковой частоты, выделение которой сопровождается механическими колебаниями частиц среды (воздуха). Это приводит к изменению давления по сравнению со статическим. Разность между статическим давлением и давлением в данной точке звукового поля называется звуковым давлением и измеряется в паскалях [24, 30, 33].

Действие звукового давления на РТС аналогично действию вибрации, так как оно возбуждает механические колебания деталей и узлов конструкции радиоаппаратуры. В отличие от механических вибраций величина звукового давления зависит не только от уровня этого давления, но и от площади изделия. Поэтому различные конструктивные элементы по-разному реагируют на звуковое давление. Так, например, в электронных лампах возникает микрофонный эффект, колеблются контакты реле и отдельные малогабаритные

элементы схем, а также может произойти возбуждение корпуса радиоэлемента под действием распределенного усилия.

Процессы старения и изнашивания. Известно, что после продолжительного периода нормальной эксплуатации наступает период, когда увеличивается интенсивность отказов радиоэлементов. Это возрастание интенсивности отказов происходит из-за необратимых изменений параметров и характеристик элементов и технических систем, вызванных их старением и износом. Старение элементов является результатом сложных физико-химических процессов, происходящих в элементах радиоаппаратуры в течение всего времени эксплуатации. Эти процессы, протекая непрерывно, ускоряются под воздействием внешних факторов, рассмотренных выше.

Старение материалов и элементов проявляется по-разному. Например, каучуковые материалы становятся жесткими и ломкими, покрываются трещинами, которые со временем удлиняются по поверхности и распространяются вглубь. Магнитодиэлектрики изменяют свою магнитную проницаемость. В непроволочных резисторах в процессе старения продолжается кристаллизация проводящего слоя, что приводит к медленному уплотнению этого слоя и уменьшению сопротивления. С другой стороны, окисление проводящего слоя вызывает увеличение сопротивления непроволочного резистора. В бумажных герметизированных конденсаторах снижается сопротивление диэлектрика из-за старения изоляции. У герметизированных электролитических конденсаторов спустя 3000...4000 ч нарушается герметичность, что приводит к быстрому ухудшению свойств конденсаторов.

Электронные лампы в процессе работы постепенно ухудшают свои характеристики. Это проявляется в основном в уменьшении крутизны и тока эмиссии.

Электрические нагрузки. В РТС электрические нагрузки в элементах появляются при прохождении полезного сигнала по линии, в состав которой входят эти элементы, при подключении к этим элементам питающих напряжений, необходимых для их нормальной работы. Если электрические нагрузки не превышают допустимых значений, оговоренных в технических условиях, то их влияние на надежность РТС незначительно.

Однако в процессе эксплуатации могут происходить недопустимые изменения электрических нагрузок. Причины их появления различны. Например, изменение питающего напряжения сети, неправильный выбор режима при проектировании, нестабильность нагрузки последующего каскада и т. п. Появление электрических перегрузок приводит к изменениям температурного режима со всеми вытекающими отсюда последствиями (см. влияние температуры), к электрическим пробоям между различными элементами схемы, к отказам при включении — выключении аппаратуры из-за переходных процессов, возникающих в схемах непосредственно после включения или выключения.

Поэтому при эксплуатации следует периодически контролировать электрические режимы работы комплектующих элементов, стараясь предотвратить их работу в режиме, близком к предельному.

2.5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Известно, что суммарная стоимость радиотехнического комплекса зависит от затрат на разработку, изготовление и эксплуатацию. Причем соотношение между указанными затратами определяется показателями надежности используемых элементов и комплекса в целом. Поэтому в общем случае суммарную стоимость РТК можно рассматривать как функцию [18]

$$C=\varphi(C_{прз},\ C_{эк},\ \Psi_1,\ \ldots,\ \Psi_к), \qquad (2.34)$$

где $C_{прз}$ — стоимость производства комплекса; $C_{эк}$ — стоимость его эксплуатации; $\Psi_1, \ldots, \Psi_к$ — показатели надежности комплекса.

Стоимость производства (себестоимость) включает затраты, связанные с проектированием и изготовлением комплекса. Очевидно, для создания более надежных РТК потребуются дополнительные экономические затраты. Они связаны с увеличением расходов на проектирование и производство, на испытания и отбор более надежных деталей и комплектующих элементов, на резервирование отдельных узлов и эле-

ментов, на разработку устройств контроля работоспособности аппаратуры и прогнозирования отказов и на другие мероприятия, обеспечивающие повышение надежности. Поэтому стоимость производства можно представить как функцию показателей надежности

$$C_{\text{прз}} = \varphi_1(\Psi_1, \ldots, \Psi_{\text{к}}). \tag{2.35}$$

Более детально вопросы увеличения стоимости производства при улучшении показателей надежности изложены в [18]. Эксплуатация высоконадежных РТК приводит, как правило, к снижению эксплуатационных расходов и к повышению эффективности применения таких комплексов. Уменьшение эксплуатационных затрат объясняется тем, что в этом случае затрачивается меньше усилий и средств на поддержание этой аппаратуры в работоспособном состоянии.

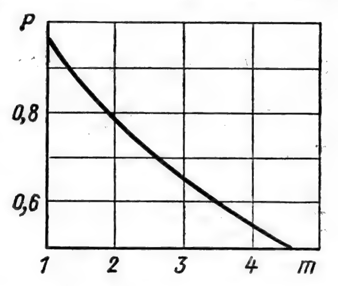


Рис. 2.8. Необходимый резерв числа систем при вероятности безотказной работы меньше 0,95.

Влияние надежности на стоимость эксплуатации систем с требуемой эффективностью можно проследить на следующем примере (рис. 2.8). Пусть необходимо изготовить систему с вероятностью безотказной работы $P = 0{,}95$. В процессе производства удалось достичь всего 0,5. Ввиду низкой надежности системы, чтобы компенсировать недостаток производства, в процессе применения приходится осуществлять дублирование. Из рис. 2.8 (где m обозначает число систем, а P — вероятность безотказной работы) видно, что в данном случае потребуется четыре дополнительных системы. Из рассмотрения этого примера следует, что аппаратура с малой надежностью требует бóльших затрат при ее эксплуатации.

При оценке стоимости эксплуатации РТК следует учитывать различного рода затраты в течение определенного периода эксплуатации (года, срока службы и т. д.). К таким расходам относятся:

— затраты на обслуживающий персонал (заработная плата, питание, спецодежда и т. д.);

— затраты на проведение технических обслуживаний;

— расходы на ремонт;

— затраты на обеспечение условий работы аппаратуры и обслуживающего персонала;

— затраты, необходимые для обеспечения выполнения задачи;

— расходы на транспортирование и хранение;

— административные расходы (стоимость на содержание руководящего состава и других работников аппарата управления) и т. д.

При этом можно рассматривать текущие и средние затраты за определенный период эксплуатации, удельные средние затраты на проведение одного технического обслуживания, ремонта и т. д.

Для количественной оценки стоимости эксплуатации используется нормированный коэффициент экономической эффективности, представляющий собой долю прироста накоплений за год по отношению к величине накоплений к началу года [17]:

$$K_{\text{ээ}} = (C_i - C_{i-1}) / C_{i-1}, \tag{2.36}$$

где C_i, C_{i-1} — приведенная величина затрат на конец i-го и $(i-1)$-го года соответственно.

Из (2.36) следует, что разновременные затраты, осуществляемые в процессе эксплуатации, необходимо привести к одному моменту времени. Эти приведенные затраты определяются по формуле сложных процентов

$$C_i = C_{нач}(1+K_{ээ})^i, \tag{2.37}$$

где $C_{нач}$ — затраты в начальный момент рассматриваемого периода.

Выражение (2.37) отражает рост накоплений, который в общем виде можно описать с помощью следующей модели. Приращение стоимости $\Delta C = C_i - C_{i-1}$ за интервал времени $[t, t+\Delta t]$ пропорционально произведению величины накоплений к началу интервала на длительность интервала, т. е.

$$\Delta C = \varkappa C(t)\Delta t, \tag{2.38}$$

где $C(t)$ — накопление к моменту t; $\varkappa$ — коэффициент пропорциональности.

Переходя к пределу при $\Delta t \longrightarrow 0$, получаем дифференциальное уравнение

$$dC/dt = \varkappa C(t). \tag{2.39}$$

Решением уравнения (2.39) является

$$C(t) = C_{нач} \exp(\varkappa t), \tag{2.40}$$

где $C_{нач}$ — начальные вложения.

Согласно [17] считаем, что для одного года календарное время $t_{кал} = 8760$ ч и

$$C_{нач}(1+K_{ээ}) = C_{нач} \exp(\varkappa t_{кал}). \tag{2.41}$$

Поэтому $\varkappa = [\ln(1+K_{ээ})]/t_{кал}$.

Выражение (2.41) позволяет определить приведенные затраты при условии, что вложения средств осуществляются в произвольные моменты времени в течение года.

Предположим, что независимые затраты $C_{нач}$, C_1, ..., C_r осуществляются в моменты времени 0, t_1, ..., $t_r < t_{кал}$. Тогда затраты, приведенные к моменту $t_{кал}$, следует вычислять по формуле

$$C(t_{кал}) = \sum_{i=0}^{r} C_i \exp[\varkappa(t_{кал} - t_i)], \tag{2.42}$$

а затраты, приведенные к начальному моменту,

$$C(0) = \sum_{i=0}^{r} C_i \exp(-\varkappa t_i). \tag{2.43}$$

В ряде случаев некоторые затраты задаются по наработке РТК. Тогда необходимо перейти к соответствующим показателям по календарному времени. Пусть величина затрат в единицу календарного времени составляет $C_{кал1}$. Тогда, сохраняя допущение о постоянстве относительной скорости роста вложений, суммарная, приведенная к начальному моменту времени, величина затрат определяется так:

$$C(0) = \int_0^{t_{эк}} C_{кал1} \exp(-\varkappa t)\, dt = C_{кал1}[1 - \exp(-\varkappa t_{эк})]/\varkappa, \tag{2.44}$$

где $t_{эк}$ — рассматриваемый интервал времени эксплуатации.

Величина суммарных затрат для различных видов аппаратуры в зависимости от принятых показателей надежности рассчитывается по-разному. В [18] приведены рекомендации для расчета этих затрат. Причем аппаратура в зависимости от показателей надежности разделена на 10 групп. Например, к первой группе относится аппаратура, надежность которой характеризуется средней наработкой до первого отказа T. Для такой аппаратуры средняя величина суммарных затрат равна

$$\overline{C} = \overline{C}_{прз} + \overline{C}_{о} + \overline{C}_{р} T, \tag{2.45}$$

где $\overline{C}_{прз}$ — средняя стоимость производства; $\overline{C}_{о}$ — средние потери от отказа; $\overline{C}_{р}$ — средние удельные затраты на обеспечение работы аппаратуры.

Для аппаратуры четвертой группы, надежность которой характеризуется вероятностью безотказной работы за заданное время, средняя величина суммарных затрат вычисляется по формуле

$$\overline{C} = \overline{C}_{прз} + \overline{C}_{о}[1 - P(t)] + C_{зад} P(t), \tag{2.46}$$

где $P(t)$ — вероятность безотказной работы аппаратуры за заданное время; $C_{зад}$ — величина текущих затрат, необходимых для выполнения одной задачи.

Кроме рассмотренных показателей экономической оценки эксплуатации РТК различные авторы [14, 24] используют и другие.

Наиболее часто употребляются коэффициент стоимости эксплуатации и стоимость одного часа работы РТК по прямому назначению.

Под *коэффициентом стоимости эксплуатации* понимается отношение стоимости эксплуатации аппаратуры в течение рассматриваемого отрезка времени к стоимости ее производства

$$K_{цэк} = C_{эк}/C_{прз}. \tag{2.47}$$

Стоимость эксплуатации РТК в 10 ... 100 раз больше, чем их стоимость на стадии производства [14].

Представление о числовых значениях некоторых рассмотренных стоимостных характеристик дает следующая таблица [24].

О сложности аппаратуры можно ориентировочно судить по количеству комплектующих элементов.

Параметры	Тип аппаратуры		
	РЛС	Связная	Навигационная
Число комплектующих схемных элементов, шт.	6100	1600	540
Среднее время безотказной работы, ч	55	390	337
Стоимость производства (себестоимость) аппаратуры, усл. ед.	100	1,5	1,2
Стоимость обслуживающего персонала за год, усл. ед.	57	17,2	7,17
Стоимость расходов на материалы за год, усл. ед.	3	0,3	0,16
Стоимость эксплуатации за год, усл. ед.	60	17,5	7,33
Коэффициент стоимости эксплуатации	0,6	12	6

В приведенной таблице при рассмотрении стоимости на содержание обслуживающего персонала учитывалась зарплата, питание, обмундирование, административные расходы и т. п. Стоимость материалов дополнительно включает стоимость транспортирования и административные расходы без учета расходов на хранение.

Из таблицы видно, что коэффициент стоимости эксплуатации больше у менее сложной аппаратуры.

Стоимость одного часа работы РТК по прямому назначению определяется по формуле

$$C_{1р}(t_{пр}) = C/t_{пр}, \tag{2.48}$$

где $t_{пр}$ — суммарное время работы аппаратуры в режиме применения.

Величина $C_{1р}(t_{пр})$ очень удобна для сравнительных оценок аппаратуры, находящейся в эксплуатации, так как позволяет оценить эффективность использования аппаратуры с учетом расходов на эксплуатацию.

Глава 3

ВОССТАНАВЛИВАЕМОСТЬ СИСТЕМЫ

3.1. СУЩНОСТЬ ВОССТАНАВЛИВАЕМОСТИ СИСТЕМЫ

Восстанавливаемость, включающая приспособленность систем к восстановлению работоспособности и способность обслуживающего персонала выполнять различные виды работ в процессе эксплуатации, относится только к ремонтируемым системам и характеризуется их ремонтопригодностью.

Ремонтопригодность — это свойство системы, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения ее отказов, повреждений и устранения их последствий путем проведения технического обслуживания и ремонтов [20]. Поэтому конструкция системы должна обеспечивать максимальную ремонтопригодность и минимальное время пребывания ее в неработоспособном состоянии в любых условиях эксплуатации.

Таким образом, ремонтопригодность систем характеризует лишь техническую сторону восстанавливаемости. Быстрота же восстановления зависит также от квалификации обслуживающего персонала и материально-технического снабжения. В этом проявляется организационная сторона восстанавливаемости.

Отказ системы «человек — техника» может произойти не только из-за отказа системы, но и вследствие отказа оператора. В восстановлении работоспособности оператора проявляется второе свойство восстанавливаемости системы. Восстановление работоспособности обслуживающего персонала — совокупность мероприятий, устраняющих отказы операторов и уменьшающих количество ошибок (отдых, замена, лечение и т. п.), допущенных ими в процессе эксплуатации системы.

Ремонтопригодность, зависящая от приспособленности конструкции системы к работам, выполняемым при различных видах технического обслуживания и ремонтов, характеризуется различным содержанием работ при техническом обслуживании и ремонте, местом их выполне-

ния, составом и квалификацией обслуживающего персонала и применением вспомогательной аппаратуры. Поэтому, кроме понятия «ремонтопригодность», широкое распространение получили понятия «эксплуатационная технологичность», «ремонтная технологичность», «контролируемость», «доступность» и др. Они конкретизируют понятие «ремонтопригодность» систем в отношении их приспособленности к работам по поддержанию работоспособности, устранению отказов, ремонтам различного вида, контролю технического состояния.

Эксплуатационная технологичность — это свойство конструкции систем, которое характеризует их приспособленность к проведению работ по техническому обслуживанию, по подготовке к применению, в режиме применения и по выполнению заключительных операций после применения. В связи с важностью проведения работ по техническому обслуживанию систем они будут подробно рассмотрены в разд. II.

Проведение подготовительных работ при эксплуатации систем в короткие сроки имеет особое значение для большинства эксплуатирующих организаций[1]. Это обстоятельство позволяет ввести специальное понятие «подготовляемости» системы «человек — техника». Как правило, системы могут находиться в различной степени готовности к применению. Для перевода систем из режима хранения (дежурства) в режим применения требуется выполнить соответствующие работы, продолжительность (или вероятность) выполнения которых зависит от конструктивных особенностей систем, от квалификации и тренированности обслуживающего персонала (см. гл. 4). Поэтому понятие «эксплуатационная технологичность» относится к системе «человек — техника» в целом.

В зависимости от особенностей, степени износа и повреждений технических систем, а также трудоемкости ремонтных работ различают следующие виды ремонта [29]: текущий, средний и капитальный.

Текущий ремонт — ремонт, осуществляемый в процессе эксплуатации, для гарантированного обеспечения работоспособности системы и состоящий в замене и восстановлении ее отдельных частей и их регулировке. Текущий ремонт, как правило, производится силами обслуживающего персонала на месте эксплуатации.

Средний ремонт является плановым и заключается в восстановлении тактико-технических характеристик системы путем проведения ремонта или замены неисправных составных частей. При среднем ремонте обязательно проверяется техническое состояние остальных частей с устранением обнаруженных повреждений. Средний ремонт выполняется подвижными (ремонтными бригадами) или стационарными ремонтными службами (мастерскими).

Капитальный ремонт — это ремонт, осуществляемый с целью восстановления исправности и полного или близкого к полному восстановления ресурса системы с заменой или восстановлением любых ее частей, включая базовые, и их регулировкой. Этот вид ремонта является плановым и выполняется стационарными ремонтными предприятиями.

Плановый ремонт (ПР) — это ремонт, предусмотренный в нормативной документации и осуществляемый в плановом порядке [29]. Плановый ремонт может проводиться в процессе технического обслуживания, а также при выполнении среднего и капитального ремонтов. Он

---

[1] Здесь и в дальнейшем под эксплуатирующими организациями будем понимать организации, занимающиеся эксплуатацией систем.

выполняется независимо от наличия или отсутствия отказов и повреждений.

Иногда в процессе эксплуатации возникает необходимость в проведении неплановых ремонтов. *Неплановым ремонтом* называется такой ремонт, выполнение которого оговорено в нормативной документации, но осуществляется в неплановом порядке.

Ремонтная технологичность — это свойство конструкции системы или ее составных частей, которое характеризует ее приспособленность к проведению ремонтных работ по восстановлению работоспособности отдельных узлов и элементов или системы в целом. Отсюда следует, что объектом ремонтных работ может быть РТК в целом, отдельные системы, подсистемы, устройства, узлы, каскады и элементы. Исходя из этого все системы можно поделить на ремонтируемые и неремонтируемые. *Ремонтируемая система* — это такая система, исправность и работоспособность которой в случае возникновения отказа или повреждения подлежит восстановлению. Термины «ремонтируемая система» и «неремонтируемая система» не заменяют понятия «восстанавливаемая система» и «невосстанавливаемая система», так как первые характеризуют ее приспособленность к проведению ремонта, а вторые относятся к условиям восстановления работоспособности систем в конкретной ситуации в процессе эксплуатации.

Более частными понятиями ремонтопригодности систем являются: контролируемость, доступность, легкосъемность (разбираемость).

Контролируемость — это такое свойство системы, которое характеризует ее приспособленность к контролю технического состояния при эксплуатации и ремонте.

Доступность системы — это рациональное размещение деталей и сборочных единиц системы в соответствии с потребностями в техническом обслуживании и ремонте.

Легкосъемность (разбираемость) системы характеризует ее приспособленность к демонтажу при техническом обслуживании и ремонте.

3.2. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ СИСТЕМЫ

Ремонтопригодность системы характеризуется, в первую очередь, продолжительностью ее пребывания в неработоспособном состоянии, затратами труда и материальных средств на выполнение профилактических и восстановительных работ. Указанные характеристики являются функцией большого числа факторов конструктивного, производственно-технологического и эксплуатационного характера. Требуемые свойства конструкции системы, характеризующие ее приспособленность к техническому обслуживанию и ремонту, закладываются и обеспечиваются на этапе проектирования. Поэтому важно правильно сформулировать необходимые тактико-технические требования к проектируемым системам по ремонтопригодности.

Ремонтопригодность системы зависит от характера условий эксплуатации и ремонта, особенностей конструктивного исполнения системы по ее приспособленности к техническому обслуживанию и ремонту, качества эксплуатационной и ремонтной документации [28].

Условия эксплуатации и ремонта характеризуются принятой системой технического обслуживания и ремонта, условиями выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту, квалификацией и составом персонала, который эксплуатирует и ремонтирует системы,

а также применяемой системой материально-технического обеспечения эксплуатации и ремонта.

Виды технического обслуживания и ремонта, их периодичность и объем должны отражать конструктивные особенности системы и условия ее эксплуатации.

Условия выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту зависят от технической оснащенности рабочих мест контрольно-измерительной аппаратурой, инструментом и другим вспомогательным оборудованием, от организации труда, степени автоматизации выполнения трудоемких операций и т. д. Применение специальных приспособлений, облегчающих проведение технического обслуживания и ремонта, значительно сокращает время, затрачиваемое на восстановление аппаратуры. При этом обслуживающему персоналу необходимо соблюдать меры электробезопасности и другие правила техники безопасности, невыполнение которых может нанести ущерб их здоровью. Защита же обслуживающего персонала от воздействия высокого напряжения, СВЧ излучения и мягких рентгеновских лучей должна, в первую очередь, предусматриваться самой конструкцией аппаратуры. Если обслуживающий персонал вынужден использовать индивидуальные средства защиты, то это увеличивает продолжительность технического обслуживания и ремонта.

Квалификация обслуживающего персонала включает в себя определенный комплекс теоретических знаний и практических навыков, необходимых для выполнения всех работ в процессе эксплуатации данной системы. Особое значение при этом играют практические навыки, связанные с умением быстро и правильно выполнять операции сборки и разборки аппаратуры, грамотно использовать контрольно-измерительную аппаратуру, правильно применять методы обнаружения отказов и повреждений и т. д.

Правильно организованная система материально-технического обеспечения создает необходимые запасы ЗИП и других материальных средств и своевременно удовлетворяет потребности в них при проведении технического обслуживания и ремонта.

Конструктивное исполнение системы и приспособленность к техническому обслуживанию и ремонту должны удовлетворять требованиям [28]:

1. Унификации и стандартизации системы и ее составных частей.
2. Преемственности технологических процессов технического обслуживания и ремонта однотипных в конструктивном отношении систем, учитывающих типизацию технологических процессов, оборудования, оснастки и др.
3. Приспособленности к рациональным методам контроля технического состояния систем с помощью способов и средств контроля, согласованных с заказчиком.
4. Принципам рационального расчленения и расположения сборочных единиц системы, учитывающим возможность и независимость выполнения операций технического обслуживания, ремонта и др. Рациональное деление конструкции системы на стойки (шкафы), блоки, узлы (платы) обеспечивает высокое совершенство конструкции и приводит к сокращению временных затрат при выполнении различных работ. Место расположения аппаратуры в целом и рациональное размещение блоков в шкафах оказывает значительное влияние на восстанавливаемость. Расположение в тесном помещении затрудняет доступ к стойкам

и отдельным блокам. Это вынуждает обслуживающий персонал работать в неудобных позах, а также не дает возможности удобно разместить контрольно-измерительные приборы и необходимую документацию. Исследования инженерно-психологического характера показали, что упорядочение в размещении блоков, органов контроля и управления работой в большой степени влияет на безошибочность работы операторов, сокращает время на обнаружение отказа.

5. Конструктивным способам соблюдения единственности сборки систем (например, использование маркировки, смещенных отверстий и др.), исключающим возможность их неправильного монтажа при ремонте. Маркировка элементов и узлов (модулей, микромодулей и других отдельных каскадов) в соответствии с электрической принципиальной схемой или схемой соединений значительно облегчает и упрощает обнаружение отказавшего элемента или узла обслуживающим персоналом.

6. Доступности деталей, узлов, устройств системы при техническом обслуживании и ремонте. Доступность может характеризоваться коэффициентом доступности к элементам конструкции системы при устранении отказов и проведении ТО

$$K_{\text{дуо}} = t_{\text{уо}}/(t_{\text{уо}} + t_{\text{уоб}}), \quad K_{\text{дто}} = t_{\text{то}}/(t_{\text{то}} + t_{\text{тоб}}),$$

где $t_{\text{уо}}$ и $t_{\text{то}}$ — чистое суммарное время, затрачиваемое на устранение отказов и техническое обслуживание; $t_{\text{уоб}}$ и $t_{\text{тоб}}$ — суммарное время балластных работ, выполнение которых необходимо произвести до и после устранения отказа и технического обслуживания. К балластным работам относятся работы, связанные с подготовкой аппаратуры и рабочего места к выполнению необходимых операций, а также необходимые разборочно-сборочные работы и т. п. Очевидно, чем меньше объем балластных работ, тем выше доступность конструкции.

7. Легкосъемности деталей (узлов и т. д.) системы при техническом обслуживании и ремонте исходя из установленных показателей их безотказности, долговечности и сохраняемости.

8. Взаимозаменяемости однотипных деталей и узлов с учетом их геометрических размеров, посадок, характеристик, рабочих параметров и др.

9. Приспособленности составных частей системы к выполнению регулировочно-доводочных работ в процессе технического обслуживания и ремонта, учитывающих достаточность регулирующих элементов в составных частях системы, пределы изменения значений параметров с использованием регулировочных устройств, возможность регулировки параметров цепей взаимосвязанных составных частей путем регулировки параметров отдельных звеньев этих цепей и др.

10. Приспособленности конструкции изнашивающихся деталей к восстановлению до первоначальных или ремонтных размеров с применением прогрессивной технологичности восстановительных работ.

Степень ремонтопригодности во многом определяется качеством эксплуатационной и ремонтной документации. Наличие в составе документации схем (карт) поиска неисправностей (отказов), четких указаний по технологии замены или ремонта узлов и элементов системы значительно сокращает время восстановления работоспособности.

3.3. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ

Показатели ремонтопригодности систем принято делить на две группы: оперативные (временные) и экономические.

Первые характеризуют время, в течение которого система находится в работоспособном (неработоспособном) состоянии за какой-либо период эксплуатации в связи с проведением восстановительных работ. Вторые позволяют оценить затраты труда и материальных средств на техническое обслуживание и ремонты. С другой стороны, показатели ремонтопригодности можно классифицировать как основные и дополнительные. Первые позволяют оценить систему с точки зрения выполнения требований заказчика к ее ремонтопригодности в целом, что позволяет проконтролировать эти показатели при проектировании, изготовлении и эксплуатации. Вторые характеризуют отдельные факторы ремонтопригодности, дающие возможность оценить полноту их учета в конструкции.

К группе основных оперативных показателей относятся: среднее время восстановления $T_в$, вероятность восстановления работоспособности в заданное время $P_в(t_в)$ и параметр потока восстановления $\mu(t_в)$. Рассмотрим их подробнее.

Среднее время восстановления — это математическое ожидание времени восстановления работоспособности. Время восстановления складывается из времени, затрачиваемого на обнаружение, поиск причин отказа и устранение последствий отказа [20].

При известном законе распределения времени восстановления работоспособности величина $T_в$ определяется по формуле

$$T_в = \int_0^\infty t_в f(t_в)\, dt_в, \tag{3.1а}$$

где $f(t_в)$ — плотность вероятности распределения времени восстановления $t_в$.

В теоретических исследованиях для времени восстановления РТС широко используются следующие законы распределения: экспоненциальный, Эрланга, Вейбулла, логарифмически-нормальный и нормальный.

Известно [6], что экспоненциальный закон наиболее справедлив для определения $T_в$ относительно простой аппаратуры или аппаратуры модульного типа, в которой ремонт производится заменой элемента или модуля. Кроме того, экспоненциальный закон проявляется при ремонте ЭВМ, в которых поиск повреждений и отказов выполняется с помощью тестов. В этом случае

$$f(t_в) = [\exp(-t_в/T_в)]/T_в.$$

Для аппаратуры более сложной, когда поиск отказов производится вручную, целесообразно использовать логарифмически-нормальный закон или закон Эрланга распределения времени восстановления.

Однако в большинстве случаев закон распределения времени восстановления хорошо описывается распределением Вейбулла, которое является универсальным для аппаратуры различных типов.

Следует отметить, что рассмотренные законы распределения времени восстановления практически совпадают при $t_в = T_в$, а при $t_в > 1{,}5T_в$ мало отличаются от экспоненциального закона распределения. Если

же $t_в < T_в$, то рассмотренные законы значительно отличаются друг от друга.

Среднее время восстановления может быть определено по статистическим данным как оценка максимального правдоподобия

$$T^*_в = \sum_{i=1}^{n} t_{вi}/n, \qquad (3.1б)$$

где $t_{вi}$ — время, затраченное на обнаружение и устранение i-го отказа; n — количество отказов, устраненных за рассматриваемый интервал времени.

Среднее время восстановления характеризует не только ремонтопригодность аппаратуры, но и подготовленность обслуживающего персонала, его квалификацию и опыт в обнаружении и устранении отказов. Поэтому в качестве характеристики рассеивания времени восстановления пользуются дисперсией, которая при известном законе распределения $t_в$ определяется по формуле

$$D(t_в) = \int_0^{\infty} (t_в - T_в)^2 f(t_в)\, dt_в,$$

а по статистическим данным — в соответствии с выражением

$$D^*(t_в) = \sigma^2_*(t_в) = \sum_{i=1}^{n} (t_{вi} - T^*_в)^2/(n-1). \qquad (3.2)$$

При определении оценок $T^*_в$ и $D^*(t_в)$ необходимо иметь в виду, что формулами (3.1б) и (3.2) можно пользоваться лишь при достаточно большом числе статистических данных, т. е. $n > 30 \ldots 40$.

Точность определения среднего значения характеристики оценивается значением среднего квадратического отклонения

$$\sigma(T^*_в) = \sigma_*(t_в)/\sqrt{n}. \qquad (3.3)$$

Тогда среднее время восстановления $T_в = T^*_в \pm \sigma(T^*_в)$.

Наряду с точечными оценками (3.1б) при малых объемах статистических данных рекомендуется вычислять интервальные оценки. Формулы для вычисления этих оценок зависят от вида закона распределения. Например, для экспоненциального распределения времени восстановления доверительный интервал определяется по формуле

$$2\sum_{i=1}^{n} t_{вi}/\chi^2_{\alpha/2}(K) < T_в < 2\sum_{i=1}^{n} t_{вi}/\chi^2_{1-\alpha/2}(K), \qquad (3.4)$$

где $\chi^2_{\alpha/2}(K)$ и $\chi^2_{1-\alpha/2}(K)$ — квантили χ^2-распределения, соответствующие вероятностям $\alpha/2$ и $1-\alpha/2$ и числу степеней свободы $K=2n$; α — вероятность отрицательной оценки среднего времени восстановления системы в условиях, когда фактическое значение среднего времени равно приемлемому его значению (ошибка первого рода).

Пример 3.1. В процессе эксплуатации РТС было устранено 78 отказов. Время, затраченное на их устранение, приведено в таблице [6].

Интервал времени, $t_в$, мин	Число отказов n_i	Интервал времени, $t_в$, мин	Число отказов n_i
0...25	32	125...150	2
25...50	20	150...175	0
50...75	15	175...200	2
75...100	3	200...225	1
100...125	3		

Определить среднее время восстановления.

Решение. 1. По формулам (3.1б), (3.2) и данным таблицы получим

$$T^*_в = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{\tau} n_i\, t_{вi} = \frac{1}{78}\sum_{i=1}^{0} n_i\, t_{вi} =$$

$$= \frac{2575 \ldots 4525}{78} = 3550/78 = 45{,}51 \text{ мин},$$

$$\sigma_*(t_в) =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{\tau} n_i\,(t_{вi} - T^*_в)^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{156\,281 \ldots 290\,954}{77}} =$$

$$= \sqrt{\frac{145\,477}{77}} = 43{,}5 \text{ мин},$$

где τ — число интервалов результатов наблюдений.

2. Рассчитаем точность определения $T^*_в$. Для этого вычислим по формуле (3.3) значение величины

$$\sigma(T^*_в) = \sigma_*(t_в)/\sqrt{n} = 43{,}5/\sqrt{78} =$$

$$= 4{,}93 \text{ мин}.$$

Тогда

$$T_в = T^*_в \pm \sigma(T^*_в) = 45{,}51 \pm 4{,}93 \text{ мин}.$$

Так как значения $T^*_в$ и $\sigma^*(t_в)$ близки, можно предположить, что время восстановления имеет экспоненциальное распределение. Это подтверждается проверкой с использованием χ^2-критерия.

3. Найдем величину интервальной оценки для $T_в$. Для этого вычислим

$$2\sum_{i=1}^{\tau} t_{вi} = 2 \cdot 3550 = 7124;$$

$$K = 2n = 2 \cdot 78 = 156;$$

$$\alpha = 0{,}1; \quad \chi^2_{0,05}(156) = 185{,}7;$$

$$\chi^2_{0,95}(156) = 128.$$

Подставляя эти значения в формулу (3.4), получаем

$$7100/185{,}7 < T_в < 7100/128,$$

$$38{,}2 < T_в < 55{,}5 \text{ мин}.$$

Следовательно, истинное значение времени восстановления $T_в$ с вероятностью $1-\alpha = 1-0{,}1 = 0{,}9$ находится в интервале 38,2 и 55,6 мин.

Если же имеется большое число комплектов однотипной аппаратуры, то среднее время восстановления можно определить более точно

$$T^*_в = \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n_j} t_{вij} \Big/ \sum_{j=1}^{m} n_j, \tag{3.5}$$

где $t_{вij}$ — время, затрачиваемое на обнаружение и устранение i-го отказа в j-м комплекте аппаратуры; n_j — число отказов в j-м комплекте аппаратуры; m — число комплектов аппаратуры.

Пример 3.2. В процессе эксплуатации трех однотипных РТС было зарегистрировано число отказов и суммарное время их обнаружения и устранения, которые приведены в таблице. Определить среднее время восстановления.

Характеристики	Номер РТС		
	1	2	3
Число отказов	29	34	47
Время обнаружения и устранения всех отказов, ч	110	130	137

Решение. По формуле (3.5) определим

$$T^*_в = \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n_j} t_{вij} \Big/ \sum_{j=1}^{m} n_j =$$

$$= \frac{(110 + 130 + 137)}{(29 + 34 + 47)} = 3{,}77 \text{ ч}.$$

Другим важным оперативным показателем ремонтопригодности является *вероятность восстановления работоспособности* в заданное время, под которой понимают вероятность того, что время восстановления работоспособности $t_в$ системы не превысит заданного ($t_{в\,зад}$), т. е. $P_в(t_в) = P\{t_в \leqslant t_{в\,зад}\}$. Эту вероятность иногда называют вероятностью своевременного восстановления [20].

Если известно распределение плотности вероятности времени восстановления, то вероятность своевременного восстановления системы будет равна

$$P_в(t_в) = \int\limits_0^{t_в} f(t_в)\, dt_в. \tag{3.6}$$

Например, в случае экспоненциального закона распределения плотности вероятности времени восстановления формула (3.6) примет вид

$$P_в(t_в) = \int\limits_0^{t_в} \frac{1}{T_в} \exp\left(-\frac{t_в}{T_в}\right) dt_в = 1 - \exp\left(-\frac{t_в}{T_в}\right). \tag{3.7}$$

Выражением (3.7) с достаточной для практики точностью можно пользоваться тогда, когда $t_в \geqslant 1{,}5T_в$.

Если же время восстановления распределяется по закону Эрланга, то

$$P_в(t_в) = \int\limits_0^{t_в} \frac{4t_в}{T^2_в} \exp\left(-\frac{2t_в}{T_в}\right) dt_в = 1 - \left(1 + \frac{2t_в}{T_в}\right) \exp\left(-\frac{2t_в}{T_в}\right). \tag{3.8}$$

Пример 3.3. Определить вероятность восстановления РТС орбитальных измерений в течение $t_в = 6$ ч при экспоненциальном законе, если $T_в = 3{,}77$ ч.

Решение. По формуле (3.7) находим

$$P_в(6) = 1 - \exp(-6/3{,}77) = 1 - 0{,}2039 = 0{,}7961.$$

Пример 3.4. По условиям примера 3.3 определить вероятность восстановления РТС при законе Эрланга.

Решение. По формуле (3.8) определим

$$P_в(6) = 1 - (1 + 2\cdot 6/3{,}77) \exp \times (-2\cdot 6/3{,}77) = 0{,}826.$$

Вероятность своевременного восстановления работоспособности системы определяется ее конструктивными особенностями и организационно-техническими условиями при выполнении восстановительных работ. Она показывает, с какой вероятностью при возникновении отказа в системе он будет устранен за заданное время.

Моменты восстановления образуют поток требований, аналогичный потоку отказов. Этот поток обычно называют *потоком восстановления*. Основная характеристика этого потока — параметр потока $\mu(t_в)$. Иногда этот параметр называют интенсивностью восстановления, которая представляет собой количество ремонтов, произведенных в единицу времени. Эта величина по статистическим данным может быть определена как отношение числа восстановлений аппаратуры за период наблюдения к суммарному времени восстановления

$$\mu^* = n / \sum_{i=1}^{n} t_{вi}. \tag{3.9}$$

Из (3.9) видно, что интенсивность восстановления есть величина, обратная времени восстановления. Она характеризует производительность восстановительных работ.

При экспоненциальном законе распределения плотности вероятности времени восстановления $\mu(t_{в}) = 1/T_{в} = \text{const}$.

К группе основных экономических показателей, характеризующих затраты труда и материальных средств на устранение отказов, относятся: стоимость ремонта, средняя стоимость ремонтов, коэффициент стоимости восстановления.

Стоимость ремонта включает стоимость трудовых затрат и материальных средств (деталей, материалов, электроэнергии, амортизационную стоимость контрольно-измерительной аппаратуры и другого вспомогательного оборудования). Очевидно, эта стоимость будет зависеть от вида отказа, числа привлекаемого обслуживающего персонала и его квалификации и, следовательно, является случайной величиной $C_{в}$. В качестве ее числовой характеристики широко пользуются *средней стоимостью ремонта* $\overline{C}_{в}$, которая может быть определена по статистическим данным как

$$\overline{C}^{*}_{в} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} C_{вi},$$

где n — число отказов за рассматриваемый период эксплуатации.

Знание средней стоимости ремонта (или ее оценки) позволяет произвести деление элементов, узлов, блоков и систем на восстанавливаемые и невосстанавливаемые, если известна стоимость изготовления нового образца $C_{прз}$. Оценку соотношения между $\overline{C}_{в}$ и $C_{прз}$ удобно производить с помощью коэффициента стоимости восстановления $K_{цв} = \overline{C}_{в}/C_{прз}$.

Если $K_{цв} \geqslant 1$, то экономически выгоднее заменить старый образец новым, а аппаратуру в этом случае следует считать неремонтируемой. Если $K_{цв} < 1$, систему (элемент) следует считать ремонтируемой. Однако при принятии окончательного решения необходимо учитывать и другие факторы (например, эффективность старого и нового образца).

3.4. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ВОССТАНАВЛИВАЕМОСТИ СИСТЕМ

Пути улучшения восстанавливаемости систем в общем случае определяются факторами, воздействующими на ремонтопригодность. Каждый из этих факторов является своеобразным при проектировании, производстве и эксплуатации аппаратуры. Высокая ремонтопригодность закладывается на этапе проектирования аппаратуры, если достаточно полно учтены условия будущей эксплуатации. В процессе эксплуатации имеется меньше возможностей для улучшения ремонтопригодности аппаратуры. Проведение ряда мероприятий, обеспечивающих уменьшение времени, которое затрачивается на обнаружение и устранение отказов аппаратуры, позволяет повысить восстанавливаемость аппаратуры в процессе эксплуатации. Перечислим основные мероприятия:

1. Совершенствование методов обнаружения отказов в аппаратуре, обеспечивающих уменьшение времени, затрачиваемого на отыскание отказавшего элемента.

2. Внедрение автоматических устройств поиска отказов в радиотехнических комплексах и системах и применение автоматизированной контрольно-измерительной аппаратуры.

3. Оптимальное комплектование ЗИП радиотехнических систем и рациональное его эшелонирование в условиях эксплуатирующих организаций.

4. Улучшение работы системы снабжения ЗИПом и эксплуатационно-расходными материалами, обеспечивающее своевременную доставку всего необходимого для ремонта РТС и комплекса в целом.

5. Рациональная организация рабочего места.

6. Повышение квалификации обслуживающего персонала и опыта его работы.

7. Внедрение усовершенствований техники, обеспечивающих улучшение ремонтопригодности аппаратуры.

8. Повышение эффективности мероприятий по предотвращению отказов.

9. Совершенствование эксплуатационной и ремонтной документации.

Глава 4

ГОТОВНОСТЬ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

4.1. ГОТОВНОСТЬ СИСТЕМЫ МНОГОКРАТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

В системе многократного применения периоды работы, в которые она решает поставленную задачу, чередуются с периодами простоя, в которые происходит восстановление (ремонт) аппаратуры. Такая система может находиться в одном из двух состояний: исправном или неисправном. Поэтому можно написать

$$P_{и}(t)+P_{в}(t)=1, \tag{4.1}$$

где $P_{и}(t)$ — вероятность того, что система находится в исправном состоянии; $P_{в}(t)$ — вероятность того, что система находится в неисправном состоянии (в состоянии восстановления).

Для ремонтируемых систем время наработки на отказ и время восстановления определяются соответственно выражениями (2.6), (3.1а), а расчет тех же показателей может быть произведен по формулам (2.15), (3.1б).

Целесообразно считать, что чем больше времени система находится в работоспособном состоянии и чем меньше время вынужденных простоев, тем выше ее состояние к применению — готовность. Для количественной оценки состояния к применению вводят понятия коэффициента готовности.

Под коэффициентом готовности $K_{г}(t)$ понимается вероятность того, что в заданный момент времени система исправна, т. е. $K_{г}(t)=P_{и}(t)$, где $P_{и}(t)$ — вероятность нахождения системы в исправном состоянии в момент t. В соответствии с [20] *коэффициент готовности* — это вероятность того, что система (или комплекс в целом) окажется работоспособной в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование системы по назначению не предусматривается.

Если среднее время безотказной работы аппаратуры и среднее время восстановления (ремонта) распределены по экспоненциальному закону, то уравнение для коэффициента готовности $K_{г}(t)$ выражается формулой [33]

$$K_{г}(t)=\frac{T_{о}}{T_{о}+T_{в}}\left[1+\frac{T_{в}}{T_{о}}\exp\left(-\frac{T_{о}+T_{в}}{T_{о}T_{в}}\,t\right)\right]. \tag{4.2}$$

В соответствии с (4.2) вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии зависит от безотказности работы T_0, восстанавливаемости $T_в$ и времени эксплуатации t. В пределе, когда $t \longrightarrow \infty$, приходим к выражению

$$K_г(\infty) = T_0/(T_0+T_в).$$

Таким образом в установившемся (стационарном) процессе эксплуатации коэффициент готовности не зависит от состояния системы в начале ее эксплуатации. График зависимости $K_г(t)$ показан на рис. 4.1.

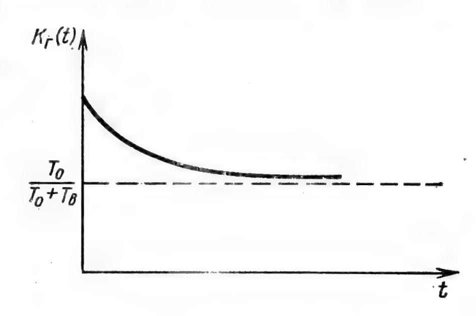


Рис. 4.1. Зависимость $K_г(t)$.

Для современных систем длительного использования всегда выполняется условие $T_0 \gg T_в$. Тогда можно записать

$$K_г = T_0/(T_0+T_в). \tag{4.3}$$

Следовательно, коэффициент готовности показывает относительное время нахождения системы в исправном состоянии (в состоянии готовности к применению) в установившемся (стационарном) процессе эксплуатации. Величина $K_г$ может быть повышена как за счет увеличения наработки на отказ, так и за счет сокращения среднего времени восстановления.

Степень влияния факторов безотказности и восстанавливаемости на скорость изменения коэффициента готовности можно оценить по изменению средней скорости наработки на отказ V_t и среднего времени восстановления $V_в$.

Дифференцируя (4.3) по параметрам T_0 и $T_в$, будем иметь

$$V_т = \partial K_г/\partial T_0 = T_в/(T_0+T_в)^2; \tag{4.4}$$

$$V_{тв} = \partial K_г/\partial T_в = -T_0/(T_0+T_в)^2. \tag{4.5}$$

Сопоставляя (4.4) с (4.5) и учитывая, что $T_0 \gg T_в$, получаем неравенство $|V_{тв}| \gg |V_т|$.

Отсюда видно, что для повышения готовности системы наряду с повышением ее надежности путем повышения безотказности в работе следует проводить мероприятия, способствующие быстрой восстанавливаемости после возникновения отказов.

Для практического расчета коэффициента готовности можно воспользоваться формулой

$$K_г = \sum_{i=1}^{n} t_i \Bigg/ \left(\sum_{i=1}^{n} t_i + \sum_{i=1}^{n} t_{вi} \right), \tag{4.6a}$$

где t_i — время нахождения системы в исправном состоянии между $(i-1)$-м и i-м отказом; $t_{вi}$ — время, затрачиваемое на восстановление системы после возникновения i-го отказа; n — число отказов за рассматриваемый период эксплуатации.

Статистически коэффициент готовности определяется отношением суммарного времени пребывания наблюдаемых систем в работоспособном состоянии к произведению числа этих систем на продолжитель-

ность эксплуатации (за исключением простоев на проведение плановых ремонтов и технического обслуживания)

$$K_\text{г}=\sum_{i=1}^{m} t_{i\text{р}}/mT_{\text{рв}}, \quad (4.6б)$$

где $t_{i\text{р}}$ — суммарное время пребывания i-й системы в работоспособном состоянии ($i=1, 2, \ldots, m$); $T_{\text{рв}}$ — продолжительность эксплуатации, состоящей из последовательно чередующихся интервалов времени работы и восстановления.

Пример 4.1. РТС работала по 8 ч ежедневно в течение 30 дней. Определить коэффициент готовности, если за это время было два отказа, на устранение которых затрачено в общей сложности 5 ч.

Решение. В соответствии с (4.6а) получим $K_\text{г}=30\cdot 8/(240+5)=0{,}98$.

Степень выполнения задачи системой, находящейся в режиме ожидания, может быть оценена коэффициентом оперативной готовности. *Коэффициент оперативной готовности* [20] — это вероятность того, что система, находясь в режиме ожидания, окажется работоспособной в произвольный момент времени и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Под режимом ожидания понимается нахождение системы при полной или облегченной нагрузке без выполнения основных (рабочих) функций. При пребывании системы в режиме ожидания возможно возникновение отказов и восстановление ее работоспособности. Для выполнения задачи нужно, чтобы в момент возникновения необходимости в использовании система была работоспособна. Если вероятность безотказной работы системы $P(t_\text{р})$ в течение времени $t_\text{р}$ не зависит от момента начала работы t, то коэффициент оперативной готовности вычисляется по формуле $K_{\text{ог}}=K_\text{г}P(t_\text{р})$.

В системе могут отказать отдельные элементы (устройства, блоки и т. д.). В результате этого может снизиться качество функционирования и соответственно уменьшится выходной эффект, например, выполнение поставленной задачи в течение заданного интервала времени. Системы, которые в процессе эксплуатации могут частично терять работоспособность, целесообразно характеризовать альфа-процентным коэффициентом готовности $K_\alpha(t)$. *Альфа-процентный коэффициент готовности* [19] — это вероятность того, что система в произвольный момент времени будет находиться в состоянии, обеспечивающем возможность ее работы на уровне качества функционирования не ниже $\alpha_i\%$.

Коэффициент готовности имеет большое практическое значение при планировании работы комплекса, поскольку с его помощью можно оценить вероятность нахождения аппаратуры в исправном состоянии, включенной в произвольный момент времени.

Следует указать на ту особенность, что коэффициент готовности не учитывает простои системы при техническом обслуживании (ТО). Поэтому он используется для оценки систем, которые работают не непрерывно, а по сеансам (расписанию). Техническое обслуживание такой системы может выполняться в интервалах между применениями. Этого нельзя сделать на системах, работающих непрерывно. В общем случае система может находиться в различных состояниях: работы, восстановления после отказа, техническом обслуживании, ожидания к применению и т. д. Поэтому для оценки этих состояний, кроме коэф-

фициента готовности, существуют следующие показатели: коэффициенты простоя, технического использования, исправного действия, вероятность выполнения задачи и пр. Рассмотрим эти показатели.

4.2. ПОКАЗАТЕЛИ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ

Коэффициент простоя. Если система в произвольный момент неисправна, значит она восстанавливается (находится в состоянии простоя).

Математическое выражение для расчета вероятности нахождения системы в состоянии восстановления (простоя) определится, если в (4.1) подставить значение $P_и(t)=K_г(t)$ из (4.2). Тогда получим

$$P_в(t)=\frac{T_в}{T_о+T_в}\left[1-\exp\left(-\frac{T_о+T_в}{T_оT_в}t\right)\right]. \qquad (4.7)$$

При $T_о \gg T_в$ вероятность $P_в(t)$ быстро стремится к своему стационарному значению. Стационарное значение этой вероятности определяется путем перехода к пределу

$$\lim_{t\to\infty} P_в(t)=\frac{T_в}{T_о+T_в}.$$

Это стационарное значение вероятности нахождения системы в состоянии простоя называется *коэффициентом простоя*

$$K_{вп}=T_в/(T_о+T_в). \qquad (4.8)$$

График изменения $K_{вп}(t)$ от времени представлен на рис. 4.2.

Коэффициенты простоя и готовности, как следует из (4.1), связаны соотношением

$$K_г+K_{вп}=1. \qquad (4.9)$$

Расчетные формулы для определения коэффициента простоя запишутся аналогично (4.6а), (4.6б)

$$K_{вп}=\sum_{i=1}^{n} t_{вi} \Bigg/ \left(\sum_{i=1}^{n} t_i+\sum_{i=1}^{n} t_{вi}\right); \qquad (4.10а)$$

$$K_{вп}=\sum_{i=1}^{m} t_{iвп}/mT_{рв}, \qquad (4.10б)$$

где $t_{iвп}$ — суммарное время пребывания i-го объекта в состоянии простоя ($i=1, 2, \ldots, m$).

Если известен один из коэффициентов $K_г$ или $K_{вп}$, то второй вычисляется по формуле (4.9). Для примера 4.1 $K_{вп}=0{,}02$.

Оценку степени влияния $T_о$ и $T_в$ на коэффициент простоя можно произвести по скорости его изменения в зависимости от изменения $T_о$ и $T_в$. Дифференцируя (4.8) по параметрам $T_о$ и $T_в$, получаем

$$V_т=\partial K_{вп}/\partial T_о=-T_в/(T_о+T_в)^2; \qquad (4.11)$$

$$V_{тв}=\partial K_{вп}/\partial T_в=T_о/(T_о+T_в)^2. \qquad (4.12)$$

Сопоставляя (4.11) с (4.12) и учитывая, что $T_о \gg T_в$, получим неравенство $|V_{тв}| \gg |V_т|$.

Отсюда следует, что для снижения коэффициента простоя более эффективными являются мероприятия по улучшению восстанавливаемости.

Из сравнения (4.4), (4.5) и (4.11), (4.12) видно, что степень влияния $T_о$ (или $T_в$) на коэффициенты $K_г$ и $K_{вп}$ одинакова и отличается только знаком.

Коэффициент технического использования. При рассмотрении количественных характеристик $K_г$ и $K_{вп}$ не учитывалось время простоя системы, затрачиваемое на техническое обслуживание. Для учета этого времени вводят **коэффициент технического использования**, который является более обобщенным. *Коэффициент технического использования* [20] — это отношение математического ожидания времени пребывания системы в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени пребывания системы в работоспособном состоянии, времени простоев, обусловленных техническим обслуживанием, и временем ремонтов за тот же период эксплуатации. Статистически $K_{ти}$ определяется отношением суммарного времени пребывания наблюдаемых систем в работоспособном состоянии к произведению числа наблюдаемых на заданное время эксплуатации

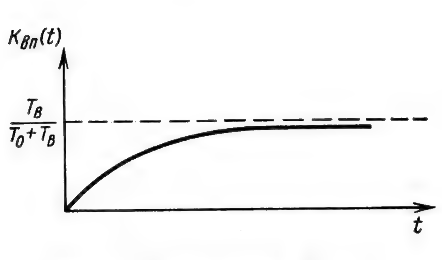


Рис. 4.2. Зависимость $K_{вп}(t)$.

$$K_{ти}=\sum_{i=1}^{m} t_{i\text{р}}/mT_{экс}, \tag{4.13а}$$

где $T_{экс}$ — продолжительность эксплуатации, состоящей из интервалов времени работы, технического обслуживания и ремонтов. Если заданное время эксплуатации $T_{экс}$ различно для каждой системы, то формула (4.13а) видоизменяется

$$K_{ти}=t_{сум}/(t_{сум}+t_{рем}+t_{обс}), \tag{4.13б}$$

где $t_{сум}$ — суммарная наработка всех систем; $t_{рем}$ — суммарное время простоев из-за плановых и внеплановых ремонтов; $t_{обс}$ — суммарное время простоев из-за планового и внепланового технического обслуживания всех систем. Время простоя по организационным причинам здесь не учитывается.

Коэффициент исправного действия. Для оценки готовности системы часто используется *коэффициент исправного действия* $K_{ид}$, под которым понимают отношение суммарного времени пребывания системы в исправном состоянии в течение определенного периода эксплуатации к длительности этого периода

$$K_{ид}=t_{исп}/(t_{исп}+t_{неис}), \tag{4.14}$$

где $t_{исп}$ — суммарное время пребывания системы в исправном работоспособном состоянии в течение периода времени $t_к$; $t_{неис}$ — суммарное время нахождения системы в неисправном неработоспособном состоянии в течение того же периода; $t_к=t_{исп}+t_{неис}$ — календарный период времени, в течение которого определяются значения $t_{исп}$ и $t_{неис}$.

Коэффициент исправного действия сходен с коэффициентом готовности. Отличие его от коэффициента готовности состоит в том, что он

учитывает простои не только по причине отказов техники, но и по другим причинам (за счет ошибок операторов, квалификации технического персонала, организационным причинам и т. д.).

В связи с учетом всех потерь времени, а не только потерь времени, связанных с неисправным состоянием техники, этот критерий является оперативно-техническим. По величине он всегда меньше коэффициента готовности.

Пример 4.2. Аппаратура связи проработала 100 ч. За это время был один отказ, длительность восстановления которого составила 2 ч. Организационные потери времени, связанные с устранением отказа, составили 2 ч. Потери сигнала за счет ошибок оператора составили 1 ч. Определить коэффициент исправного действия и коэффициент готовности аппаратуры.

Решение. В соответствии с (4.14) и (4.3) находим

$$K_{ид} = [100-(1+2+2)]/100 = 0{,}95;$$

$$K_{г} = (100-2)/100 = 0{,}98.$$

Таким образом, готовность самой аппаратуры оценивается величиной 0,98, а готовность с учетом потерь времени на организацию восстановления и ошибочных действий оператора равна 0,95.

4.3. ВЕРОЯТНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧИ СИСТЕМОЙ ОДНОКРАТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Для системы однократного применения можно выделить два эксплуатационных режима: подготовка и применение (см. гл. 1). В первом режиме система «готовится» к решению задачи. В этом режиме возможно проведение технического обслуживания, направленного на восстановление и поддержание соответствующих характеристик на заданном уровне и качественное выполнение задачи в последующем режиме. Интервалы, в которых система способна начать выполнение поставленной задачи, чередуются здесь с интервалами, в которых она не может выполнять эту задачу.

Второй режим заключается в выполнении задачи. Часто этот режим наступает в произвольный, заранее неизвестный момент времени. Поэтому работоспособность системы будет зависеть от состояния ее в данный момент времени и от появления отказов во время работы.

Если систему однократного применения рассматривать как систему, имеющую бесконечно большое время восстановления, т. е. $T_{в} = \infty$, то стационарное значение коэффициентов готовности и простоя окажутся равными

$$K_{г} = \lim P(t) = 0;$$

$$K_{вп} = \lim_{\substack{T_{в}\to\infty \\ t\to\infty}} P(t) = 1.$$

Таким образом, для оценки систем однократного применения нельзя использовать стационарный режим.

Для оценки качества выполнения основной задачи неважно сколько времени система провела в неработоспособном состоянии в режиме подготовки и как чередовались периоды хранения (простоя) и проверки работоспособности. Важно, чтобы система была способна начать выполнение задачи в тот момент времени t, когда это необходимо, и чтобы в этот период не произошло никаких нарушений работоспособности. Готовность к применению таких систем целесообразно характеризовать вероятностью выполнения задачи в определенный интервал времени. В простейшем случае это вероятность того, что система работоспособна в начале периода и не откажет при выполнении задачи, т. е. безотказно

проработает в интервале $(t, t+z)$. Эту вероятность будем обозначать $P_{\text{пр}}(z)$. Если первый режим (хранение) длится достаточно долго (t велико), то за показатель, характеризующий готовность к применению, принимается предел $P_{\text{пр}}(z)=\lim P_{\text{пр}}(t, z)$.

Допустим, что имеется система однократного применения, обслуживаемая как единое целое. Эксплуатация ее начинается в нулевой момент времени, когда система полностью обновлена, а индикация отказов происходит через некоторое случайное время. Для такой системы вероятность выполнения задачи выражается формулой [4]

$$P_{\text{пр}}(z)=\frac{T_{\text{о}}+\int\limits_0^z[1-F(t)]\,dt}{T_{\text{о}}+T_{\text{в}}+T_{\text{п}}}, \tag{4.15}$$

где $T_{\text{п}}$ — среднее время проявления отказа.

Пример 4.3. Определить вероятность выполнения задачи системой однократного применения по следующим данным:

$F(t)=1-e^{-0,1t}$; $T_{\text{о}}=15$ ч; $T_{\text{п}}=0$; $T_{\text{в}}=1$ ч; $z=2$ ч.

Решение. По формуле (4.15) находим искомую вероятность

$$P_{\text{пр}}(z)=\left(15+\int\limits_0^z e^{-0,1t}\,dt\right)\Big/(15+1)=$$

$$=(15-|e^{-0,2}|_0^2)/16=0,77.$$

В зависимости от конкретно решаемой задачи могут быть введены также и другие показатели, характеризующие качество выполнения задачи системой однократного применения.

Для ряда систем характерен режим дежурства. Перевод этих систем в режим применения требует выполнения ряда работ. Продолжительность или вероятность выполнения этих работ в течение заданного времени зависит от особенностей систем (скорости выхода в режим, наличия автоматизации, числа органов настройки и управления и т. д.) и от квалификации и тренированности обслуживающего персонала, выполняющего подготовку. Перечисленные факторы определяют особое свойство системы «человек — техника» — подготавливаемость.

4.4. ВРЕМЯ ПЕРЕВОДА СИСТЕМЫ В СОСТОЯНИЕ ГОТОВНОСТИ К РАБОТЕ

К моменту поступления распоряжения на подготовку системы к работе она может находиться в любом из n состояний S_i ($i=1, 2, \ldots, n$). Предположим, что S_n соответствует состоянию работы. Тогда время перевода системы из состояния S_i в состояние S_n определит готовность ее. Это время $t^*_{i,n}$ является случайной величиной, хотя оно и связано с выполнением конкретных операций. Случайность времени перевода системы в состояние работы обусловлена тем, что влияние различных факторов на процесс подготовки заранее точно установить невозможно.

На величину $t^*_{i,n}$ влияют следующие факторы:

— уровень подготовленности обслуживающего персонала;

— моральное, физическое, психологическое состояние его;

— наличие и техническое состояние контрольно-испытательной аппаратуры;

— условия работы: климатические, освещенность, время дня, года и т. д.;

— степень автоматизации процесса подготовки;

— уровень организации процесса подготовки и т. д.

Кроме того, время подготовки системы существенно зависит от надежности системы и от исходного ее состояния. В момент начала подготовки система может находиться в исправном или неисправном состоянии. В процессе подготовки отказ (неисправность) может появиться или не появиться. Подготовка системы к работе будет определяться временем выполнения операций (работ), обеспечивающих ее перевод из исходного состояния S_i в состояние S_n только при исправной системе к моменту начала подготовки и отсутствии отказов в процессе подготовки. Во всех остальных случаях время подготовки будет отклоняться в сторону увеличения в силу того, что необходимо устранять отказы (неисправности). Поэтому время подготовки системы к работе можно рассматривать с учетом или без учета времени, затрачиваемого на ее ремонт.

Числовой характеристикой при переводе системы в состояние готовности к работе является среднее время $T_{i,n}$ перевода ее из исходного состояния S_i в состояние работы S_n.

Если известна плотность $f_{i,n}(t/S_i)$ вероятности величины $t^*_{i,n}$, то среднее время $T_{i,n}$ подготовки системы к работе определяется по формуле

$$T_{i,n} = \int_0^\infty t f_{i,n}(t/S_i)\,dt. \tag{4.16}$$

Статистически среднее время $\tilde{T}_{i,n}$ подготовки можно вычислить по результатам эксплуатации определенного количества однотипных систем по формуле

$$\tilde{T}_{i,n} = \sum_{j=1}^{m} t_{(i,n)j} / m, \tag{4.17}$$

где $t_{(i,n)j}$ — время, затрачиваемое на перевод j-й системы из состояния S_i в состояние S_n; m — число систем, которые переводились из состояния S_i в состояние S_n.

На основании сравнения времени, которое затрачивает обслуживающий персонал однотипных систем (комплексов) на перевод их в состояние работы со средним временем подготовки к работе таких систем (комплексов), можно судить о подготовленности данного обслуживающего персонала. Среднее время подготовки, вычисленное для группы однотипных комплексов, может служить отправной величиной для планирования их работы.

На основании расчетов и опыта эксплуатации подобных комплексов составляются руководства или инструкции, которые регламентируют процесс подготовки их к работе. Эти документы определяют и время подготовки систем к работе. Оно может быть выбрано средним. Однако в ряде случаев реальное время будет отклоняться от среднего. В связи с этим заданное время подготовки должно устанавливаться таким образом, чтобы вероятность подготовки системы в течение этого времени была бы достаточно высокой.

4.5. ВЕРОЯТНОСТЬ ПЕРЕВОДА СИСТЕМЫ В СОСТОЯНИЕ ГОТОВНОСТИ К РАБОТЕ

Одним из основных показателей готовности является вероятность перевода системы в рабочее состояние за заданное время $t_з$. Она представляет собой вероятность того, что случайное время $t^*_{(i,n)}$ перевода

системы из состояния S_i в состояние S_n не превысит заданного времени $t_з$, т. е.

$$P_{i,n}(t_з/S_i) = P(t^*_{i,n} \leqslant t_з). \tag{4.18}$$

Эта вероятность как показатель готовности широко используется на практике при оценке эффективности систем и планировании операций. Поэтому эту вероятность можно назвать оперативным показателем.

В соответствии с (4.18) вероятность перевода системы из любого исходного состояния в режим применения за время $t_з$ можно записать в виде

$$P_{i,n}(t_з/S_i) = \int_0^{t_з} f_{i,n}(t/S_i)\, dt, \tag{4.19}$$

где $f_{i,n}(t/S_i)$ — плотность распределения случайной величины $t^*_{i,n}$.

Если величина $t^*_{i,n}$ задана экспоненциальным распределением $(1/T_{i,n}) \exp(-t_з/T_{i,n})$, то (4.19) запишется следующим образом:

$$P_{i,n}(t_з/S_i) = \int_0^{t} (1/T_{i,n}) \exp(-t_з/T_{i,n})\, dt \quad \text{при} \quad 1 \leqslant i \leqslant n-1;$$

$$P_{i,n}(t_з/S_i) = 1 \quad \text{при} \quad i = 1,$$

где $T_{i,n}$ — математическое ожидание времени перевода системы из исходного состояния S_i в состояние применения S_n.

В практике эксплуатации необходимая вероятность перевода системы из любого исходного состояния в состояние применения может быть задана в виде условия

$$P_{i,n}(t_з/S_i) = P_{i,n_0}, \tag{4.20}$$

где P_{i,n_0} — заданная величина.

В этом случае из уравнения (4.19) можно найти такое значение времени $t_{(i,n)з}$, при котором будет обеспечиваться условие (4.20). Рассчитанное таким образом значение $t_{(i,n)з}$ используется в качестве регламентного времени подготовки системы к работе. Оно обычно указывается в соответствующей технической документации.

Для экспоненциального распределения получим

$$P_{i,n_0} = \int_0^{t_з} (1/T_{i,n}) \exp(t_з/T_{i,n})\, dt. \tag{4.21}$$

Из (4.21) находим

$$t_{(i,n)з} = -\ln(1 - P_{i,n_0})\, T_{i,n}. \tag{4.22}$$

Пример 4.4. Для экспоненциального закона распределения случайного времени $t^*_{i,n}$ определить соотношение между средним временем подготовки системы к работе и заданным для вероятности $P_{i,n} = 0,9$.

Решение. В соответствии с (4.22) находим $t_{(i,n)з} = -\ln(1-0,9) T_{i,n} = 2,3 T_{i,n}$.

4.6. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ГОТОВНОСТИ

Из формул (4.3), (4.8), (4.13*б*), (4.14) для критериев количественной оценки РТС многократного применения и (4.15) — систем однократного применения — видно, что коэффициенты готовности, простоя, тех-

нического использования, исправного действия, а также вероятность выполнения задачи определяются безотказностью систем, восстанавливаемостью их и зависят от плановых мероприятий по техническому обслуживанию.

Отсюда следует, что повышение готовности радиотехнических систем может быть осуществлено за счет улучшения безотказности, восстанавливаемости и организации проведения технического обслуживания.

Следует указать на две группы мероприятий, направленных на повышение готовности.

1. Мероприятия, проводимые при разработке и изготовлении систем:

— применение элементов и материалов, обладающих повышенной надежностью;

— оптимальность в построении схем;

— высокое качество изготовления аппаратуры, резервирование элементов, узлов и блоков аппаратуры;

— установка встроенной контрольно-измерительной аппаратуры и т. д.

2. Мероприятия, проводимые при эксплуатации систем:

— усовершенствование системы технического обслуживания;

— повышение квалификации обслуживающего персонала, а также тренированности его в выполнении отдельных операций;

— поддержание систем в работоспособном состоянии в процессе хранения;

— заблаговременное проведение ряда мероприятий, входящих в процесс подготовки;

— совершенствование организации режима подготовки за счет составления перечня операций, которые необходимо выполнить при переводе системы из любого режима в состояние работы, знания обслуживающим персоналом последовательности выполнения операций, указания времени на выполнение каждой операции, выделения наиболее важных среди них, знания обслуживающим персоналом признаков ненормальной работы отдельных блоков, устройств и способов их устранения и т. д.;

— уменьшение времени восстановления системы при обнаружении и устранении отказов за счет оптимизации процесса поиска отказа, улучшения организации и технологии устранения отказа, повышение квалификации обслуживающего персонала, рационального обеспечения запасным имуществом и т. д.

Глава 5

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СИСТЕМ

5.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Долговечность — свойство системы сохранять работоспособность до наступления предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов. Предельное состояние — это такое состояние системы, при котором ее дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований безопасности или неустранимого ухода заданных параметров за установ-

ленные пределы, или неустранимого снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой, или необходимости проведения среднего или капитального ремонта. Это состояние для невосстанавливаемых и восстанавливаемых систем может быть различным. Например, невосстанавливаемая система достигает предельного состояния при возникновении отказа или при достижении заранее установленной суммарной наработки. Для восстанавливаемой системы предельным состоянием считается такое, когда восстановление работоспособности возможно только при проведении среднего или капитального ремонта. Поэтому признаки (критерии) предельного состояния устанавливаются нормативно-технической документацией на данную систему [20].

Долговечность систем зависит от материального и морального износа. *Материальный износ* — это непрерывный процесс старения (изнашивания) элементов, деталей и узлов системы и зависит от его интенсивности.

Моральный износ проявляется в двух формах. Первая—удешевление производства ранее выпускаемых систем с аналогичными тактико-техническими и эксплуатационными характеристиками. Вторая — следствие выпуска новых систем и элементов с более высокими или качественно новыми характеристиками. Таким образом, моральный износ возникает вследствие создания более совершенных систем, снижения стоимости их воспроизводства и эксплуатации и зависит от темпов технического прогресса в данной области науки и техники.

Долговечность систем характеризуется техническим ресурсом и сроком службы [20].

Технический ресурс — это наработка системы от начала эксплуатации или возобновления ее после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Срок службы — календарная продолжительность эксплуатации системы от ее начала или возобновления после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Введение двух количественных характеристик долговечности позволяет полнее охарактеризовать долговечность системы, которая в процессе эксплуатации может находиться в различных режимах (применения, дежурства и т. д.). Значения этих характеристик должны определяться с учетом как материального, так и морального износа.

Долговечность различных систем, как было показано выше, определяется до заранее оговоренного предельного состояния. При этом учитываются в основном экономические соображения [11], ибо при современном уровне ремонтного производства длительность эксплуатации, например, ремонтируемах систем может быть практически неограниченной (это утверждение верно только в отношении системы в целом, без учета долговечности отдельных комплектующих элементов).

При таком подходе долговечность систем характеризует их способность выполнять свои функции с минимальными затратами на замену износившихся деталей и элементов, наладку, регулировку, ремонт и техническое обслуживание. Чем меньше суммарные затраты времени и материальных средств, расходуемых на восстановление работоспособности системы в течение всего периода ее эксплуатации, тем выше ее долговечность.

Таким образом, удешевление содержания систем увеличивает их срок службы, но снижение стоимости их воспроизводства вследствие

технического прогресса приводит к уменьшению срока службы таких систем. Снижение их стоимости производства происходит более быстрыми темпами, чем удешевление содержания. Поэтому экономически обоснованный срок службы сокращается [11]. Незнание, а отсюда и несоблюдение срока службы системы фактически означает нарушение закона социалистического хозяйствования в использовании основных фондов.

Недопустимо, чтобы система, снятие с эксплуатации которой эффективнее ее ремонта, ремонтировалась (так как не было выполнено установленное число ремонтов), а система, ремонт которой эффективнее ее списания, в соответствии с эксплуатационной документацией снималась с эксплуатации как уже отработавшая назначенный ресурс (срок службы).

Следует, однако, заметить, что долговечность некоторых систем обусловливается и неэкономическими факторами (например, безопасностью работы обслуживающего персонала).

5.2. ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕСУРС СИСТЕМ

Из определения технического ресурса системы (см. § 5.1) следует, что ресурс — это время ее работы под током в часах. Различают следующие виды ресурса: средний ресурс, назначенный ресурс, средний ресурс до среднего (капитального) ремонта, средний ресурс между средними (капитальными) ремонтами, средний ресурс до списания и гамма-процентный ресурс [20].

Каждая система характеризуется индивидуальным ресурсом $t_{\text{рс}}$. Эта величина является случайной для каждой системы и зависит от ряда факторов. Как всякая случайная величина ресурс полностью характеризуется законом распределения. Если закон распределения величины $t_{\text{рс}}$ известен, то можно определить средний ресурс, дисперсию ресурса и другие числовые характеристики.

Для неремонтируемых систем и элементов средний ресурс равен средней наработке до отказа (см. выражения (2.6) — (2.8)).

Если причиной выхода из строя элементов системы является протекание процессов старения, то ресурс часто подчиняется нормальному закону распределения. Однако встречаются случаи, когда ресурс подчиняется логарифмически-нормальному или другим законам распределения. Появление же внезапных отказов, как известно, хорошо описывается экспоненциальным законом распределения. В этом случае [26]

$$T_{\text{рс}} = T = 1/\lambda, \tag{5.1}$$

$$P(t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-t/T_{\text{рс}}), \tag{5.2}$$

где λ — интенсивность отказов; T — средняя наработка до отказа; $P(t)$ — вероятность безотказной работы.

Из выражения (5.2) следует, что при $t = T_{\text{рс}}$ вероятность безотказной работы $P(t) = 0{,}37$, т. е. при экспоненциальном законе средний ресурс равен времени, в течение которого значение $P(t)$ уменьшается до величины 0,37 (рис. 5.1).

На практике при планировании производства новых ремонтируемых систем, периодичности обновления существующего состава систем, находящихся в эксплуатации, широко пользуются назначенным ресурсом $T_{\text{нрс}}$. Под *назначенным ресурсом* $T_{\text{нрс}}$ следует понимать суммарную на-

работку системы, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от ее состояния. Величину $T_{нрс}$ можно вычислить по формуле (рис. 5.2)

$$P_{рс}(t_{рс} \geqslant T_{нрс}) = \int_{T_{нрс}}^{\infty} f(t_{рс})\, dt_{рс}, \qquad (5.3)$$

где $P_{рс}(t_{рс} \geqslant T_{нрс})$ — вероятность того, что $t_{рс} \geqslant T_{нрс}$.

Для определения величины $T_{нрс}$ необходимо задаться вероятностью $P_{рс}(t_{рс} \geqslant T_{нрс})$. Значение этой вероятности должно быть таким, чтобы не приходилось снимать с эксплуатации системы с неизрасходованным ресурсом или чтобы у значительного числа систем индивидуальный

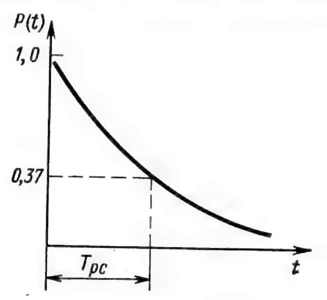


Рис. 5.1. Определение значения $T_{рс}$ при экспоненциальном законе.

Рис 5.2. Плотность распределения величины $t_{рс}$.

ресурс не оказался меньше величины $T_{нрс}$. Эти требования противоречивы, а результаты зависят от правильного выбора значения вероятности $P_{рс}(t_{рс} \geqslant T_{нрс})$.

На практике возможны случаи, когда $t_{рс} > T_{нрс}$, т. е. система выработала назначенный ресурс, но находится в работоспособном состоянии. Естественно встает вопрос о целесообразности продления эксплуатации такой системы. Решение этого вопроса зависит от результатов более детального анализа технического состояния аппаратуры с привлечением статистических данных об эксплуатации и теории прогнозирования отказов (см. гл. 6).

Пример 5.1. Известно, что величина ресурса РТС распределена по нормальному закону (справедливо для постепенных отказов) с параметрами: средний ресурс (математическое ожидание) $T_{рс} = 2500$ ч и среднее квадратическое отклонение $\sigma_{рс} = 600$ ч. Определить величину назначенного ресурса, если вероятность $P_{рс}(t_{рс} \geqslant T_{нрс}) = 0{,}75$.

Решение. Выражение (5.3) в соответствии с условием примера запишем в виде

$$P_{рс}(t_{рс} \geqslant T_{нрс}) = \frac{1}{\sigma_{рс}\sqrt{2\pi}} \int_{T_{нрс}}^{\infty} \exp \frac{-(t_{рс}-T_{рс})^2}{2\sigma^2_{рс}}\, dt_{рс}$$

или

$$1 - P_{рс}(t_{рс} \geqslant T_{нрс}) = \frac{1}{\sigma_{рс}\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{T_{нрс}} \exp \frac{-(t_{рс}-T_{рс})^2}{2\sigma^2_{рс}}\, dt_{рс}. \qquad (5.4)$$

В интеграле (5.4) сделаем замену переменной $(T_{рс}-t_{рс})/\sigma_{рс} = x$ и приведем его к табличному виду [5]

$$2\left[1 - P_{рс}(t_{рс} \geqslant T_{нрс})\right] = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{(T_{рс}-T_{нрс})/\sigma_{рс}} \exp \frac{(-x)^2}{2}\, dx = \Phi\left(\frac{T_{рс}-T_{нрс}}{\sigma_{рс}}\right).$$

Подставив значение $P_{рс}(t_{рс} \geqslant T_{нрс})$ в левую часть последнего равенства, получим $0{,}5 = \Phi[(T_{рс} - T_{нрс})/\sigma_{рс}]$.

Из табл. 23 [5] определим значение верхнего предела интеграла вероятности $(T_{рс} - T_{нрс})/\sigma_{рс} = 0{,}68$. Отсюда $T_{нрс} = T_{рс} - 0{,}68\sigma_{рс}$ или $T_{нрс} = 2500 - 0{,}68 \times 600 = 2092$ ч.

При назначении ресурса учитываются безопасность эксплуатации систем и их экономичность.

При выпуске новой системы завод—изготовитель устанавливает гарантийный ресурс, который называется гарантийной наработкой. Под *гарантийной наработкой* системы следует понимать наработку, до завершения которой изготовитель гарантирует и обеспечивает выполнение определенных требований к системе при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации, в том числе правил хранения и транспортирования. Гарантийная наработка устанавливается в технической документации или в договорах между изготовителем и заказчиком.

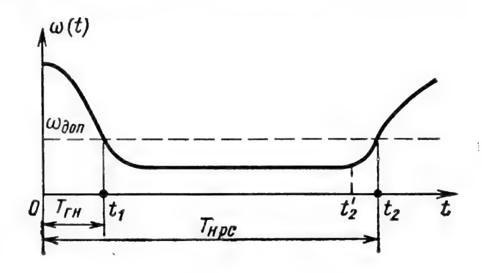


Рис. 5.3. Изменение параметра $\omega(t)$ в процессе работы системы.

Как известно, параметр потока отказов $\omega(t)$ ремонтируемой системы в зависимости от времени ее работы изменяется так, как показано на рис. 5.3, и имеет три области: приработки (от 0 до t_1), нормальной эксплуатации (от t_1 до t_2) и старения (от t_2 до t'_2).

У изготовителя нет возможности производить «тренировку» аппаратуры для полной приработки, поэтому он вынужден взять на себя все работы по обеспечению работоспособности аппаратуры, находящейся в эксплуатации.

В дальнейшем по различным соображениям длительность гарантийной наработки $T_{гн}$ увеличивается и заходит в область нормальной эксплуатации. В настоящее время для уникальной аппаратуры, выпускаемой очень малыми партиями, гарантийная наработка может быть установлена равной назначенному ресурсу. Вследствие того, что применяемые отдельные комплектующие узлы и элементы таких систем не выпускаются серийно, отсутствуют статистические данные их отказов и поэтому изготовитель обеспечивает гарантийный ремонт такой аппаратуры почти на всем периоде ее эксплуатации. Система, проработав до момента t_2, либо снимается с эксплуатации, либо отправляется в средний (капитальный) ремонт. После его выполнения системе устанавливается средний ресурс между соответствующими ремонтами и гарантийная наработка.

Кроме рассмотренных характеристик, ГОСТ 13377—75 вводит понятие «гамма-процентного ресурса» и среднего ресурса до списания. *Гамма-процентный ресурс* t_γ — это наработка, в течение которой система не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью безотказной работы γ, выраженной в процентах. Например, если вероятность безотказной работы в течение 1000 ч равняется 0,95, то это означает, что в среднем 95% систем данного типа за 1000 ч работы не потеряют свою работоспособность, т. е. $\gamma = 95\%$, а 95%-ный ресурс $t_{95} = 1000$ ч.

При $\gamma = 50\%$ гамма-процентный ресурс называется *медианным*. *Средний ресурс до списания* — это средний ресурс системы от начала эксплуатации до ее списания, обусловленного предельным состоянием.

5.3. СРОК СЛУЖБЫ И ЕГО СОСТАВЛЯЮЩИЕ

Срок службы является основным показателем долговечности системы и определяет продолжительность ее «жизни». Обычно срок службы измеряется в годах (летах) до капитального (среднего) ремонта, если таковой предусматривается, или до списания системы, не пригодной к ремонту по каким-либо соображениям (конструктивным, экономическим, безопасности эксплуатации и т. п.).

В общем случае устанавливаются следующие показатели долговечности:

— средний срок службы до капитального (среднего) ремонта $T_{сс}$;

— средний срок службы между капитальными (средними) ремонтами;

— средний срок службы до списания;

— средний срок службы;

— гамма-процентный срок службы.

Под *средним сроком службы* понимается математическое ожидание срока службы системы. Средний срок службы до среднего (капитального) ремонта — средний срок службы от начала эксплуатации системы до ее первого среднего (капитального) ремонта. После проведения соответствующего ремонта устанавливается средний срок службы до очередного ремонта.

Средний срок службы до списания — это такой средний срок службы от начала эксплуатации системы до ее списания, обусловленный предельным состоянием.

Гамма-процентным сроком службы называется календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой система не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов.

Кроме того, в технической документации в соответствии с договором между изготовителем и заказчиком устанавливается срок гарантии. *Срок гарантии* — это период, в течение которого изготовитель гарантирует и обеспечивает выполнение установленных требований к системе при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации.

Рассмотрим составляющие срока службы до первого капитального ремонта $T_{сс}$. Эту величину можно представить в виде следующей суммы:

$$T_{сс}=T_{р}+T_{ож}+T_{тор}, \qquad (5.5)$$

где $T_{р}$ — среднее суммарное время работы системы в течение срока службы; $T_{ож}$ — среднее суммарное время, в течение которого система находится в режиме ожидания или хранения; $T_{тор}$ — среднее суммарное время, затрачиваемое на проведение всех технических обслуживаний и ремонтов.

Так как интенсивность отказов при работе $\Lambda_{р}$, хранении $\Lambda_{хр}$ и обслуживании $\Lambda_{тор}$ имеет различные значения, то для пересчета времени хранения или обслуживания в эквивалентное время работы воспользуемся следующими коэффициентами [6]:

$$k_{хр}=\Lambda_{р}/\Lambda_{хр}, \qquad k_{тор}=\Lambda_{р}/\Lambda_{тор}. \qquad (5.6)$$

Предположим, что долговечность системы характеризуется назначенным ресурсом $T_{нрс}$ до капитального ремонта. Часть этого ресурса $T_{тор}/k_{тор}$ расходуется при проведении обслуживания и текущего ремонта. Будем также считать, что система часть (долю) времени a нахо-

дится в работе, а часть $(1-a)$ времени содержится в режиме ожидания (хранения). Тогда

$$T_р = (T_{нрс} - T_{тор}/k_{тор})\,a, \tag{5.7}$$

$$T'_{ож} = (T_{нрс} - T_{тор}/k_{тор})(1-a)\,k_{хр}. \tag{5.8}$$

Время $T'_{ож}$ в (5.8) представляет собой эквивалентное время, тождественно равное $T_{ож}$.

Подставив эти выражения в (5.5), получим общее выражение для составляющих срока службы системы многократного применения

$$T_{сс} = (T_{нрс} - T_{тор}/k_{тор})[a + (1-a)\,k_{хр}] + T_{тор}. \tag{5.9}$$

Если в (5.9) принять $a=1$, то получим аналогичное выражение для системы непрерывного действия

$$T_{сс} = T_{нрс} - T_{тор}/k_{тор} + T_{тор}. \tag{5.10}$$

Если же в (5.9) положить $a=0$ и учесть, что после хранения система должна работать в режиме применения продолжительностью $t_{пр}$, то выражение срока службы системы однократного применения примет вид

$$T_{сс} = (T_{нрс} - T_{тор}/k_{тор} - t_{пр})\,k_{хр} + T_{тор} + t_{пр}. \tag{5.11}$$

Выражения (5.9)—(5.11) позволяют оценить основные временные составляющие срока службы для систем различного использования, входящих в РТК.

Пример 5.2. Определить срок службы РТС многократного применения, если известно: $T_{нрс} = 10\,000$ ч, $a = 0{,}2$, $\Lambda_р = 10^{-2}$ 1/ч, $\Lambda_{хр} = 10^{-4}$ 1/ч, $\Lambda_{тор} = 5\cdot10^{-4}$ 1/ч и предусмотрено 320 технических обслуживаний, а среднее время на проведение каждого обслуживания равно 8 ч.

Решение. 1. Суммарное среднее время, затрачиваемое на проведение технических обслуживаний, $T_{тор} = 320\times8 = 2560$ ч.

2. Определим значения коэффициентов $k_{тор}$ и $k_{хр}$, воспользовавшись выражениями (5.6):

$$k_{хр} = \Lambda_р/\Lambda_{хр} = 10^{-2}/10^{-4} = 100,$$

$$k_{тор} = \Lambda_р/\Lambda_{тор} = 10^{-2}/5\cdot10^{-4} = 20.$$

3. Подставим вычисленные и исходные значения в (5.9)

$$T_{сс} = (T_{нрс} - T_{тор}/k_{тор})\,[a + (1-a)\,k_{хр}] + T_{тор} = (10\,000 - 2560/20)\,[0{,}5 + (1-0{,}5)\cdot100] + 2560 = 501\,096 \text{ ч}.$$

Таким образом, срок службы системы равен 501 096 ч.

5.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Теоретические основы надежности и эксплуатации в настоящее время не позволяют определить все количественные показатели долговечности РТС. Обычно для всех или почти для всех комплектующих элементов систем известны такие характеристики, как законы распределения времени безотказной работы, числовые и стоимостные характеристики этих элементов. Знание этих характеристик позволяет в отдельных случаях рассчитать некоторые показатели долговечности.

Если известно, что РТС состоит из γ групп по $N_1, N_2, \ldots, N_\gamma$ комплектующих элементов, средний ресурс которых соответственно равен $T_{рс1}, T_{рс2}, \ldots, T_{рс\gamma}$, то средний ресурс элементов РТС может быть определен как средневзвешенное значение средних ресурсов элементов

$$T^*_{рс} = \sum_{i=1}^{\gamma} N_i T_{рсi} \Big/ \sum_{j=1}^{\gamma} N_j. \tag{5.12}$$

Вычисленное значение можно принять за средний ресурс системы, если средняя квадратическая ошибка средневзвешенного

$$\sigma_{\text{рс}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\gamma} N_i (T_{\text{рс}i} - T^*_{\text{рс}})^2}{(\gamma - 1)\sum_{i=1}^{\gamma} N_i}} \ll T^*_{\text{рс}}. \quad (5.13)$$

Условие (5.13) очень часто не выполняется, так как значения средних ресурсов комплектующих элементов отличаются друг от друга на несколько порядков [11].

Пример 5.3. Определить средний ресурс системы, если известно, что комплектующие элементы по значению ресурса можно разделить на 5 групп. Число элементов N_i в каждой группе и их ресурс $T_{\text{рс}\,i}$ указаны в таблице.

Величина	Номер группы				
	1	2	3	4	5
N_i	5	4	12	7	2
$T_{\text{рс}i}$, ч	250	400	500	750	1000

Решение. 1. По формуле (5.12) определим средний ресурс системы

$$T^*_{\text{рс}} = \frac{5\cdot 250 + 4\cdot 420 + 12\cdot 500 + 7\cdot 750 + 2\cdot 1000}{5 + 4 + 12 + 7 + 2} = 534 \text{ ч}.$$

2. Проверим выполнение условия (5.13)

$$\sigma_{\text{рс}} = \sqrt{\frac{5(250-534)^2 + 4(400-534)^2 + 12(500-534)^2 + 7(750-534)^2 + 2(1000-534)^2}{(5-1)(5+4+12+7+2)}} = 102 \text{ ч} < T^*_{\text{рс}} = 534 \text{ ч},$$

т. е. условие (5.13) выполняется.

Если ресурсы комплектующих элементов отличаются друг от друга на два и более порядков, то условие (5.13) обычно не выполняется. В этом случае следует использовать иную методику определения показателей долговечности системы. Так, например, в [11] рассмотрены методы расчета оптимального ресурса по материальному износу при достижении минимальной стоимости 1 ч работы РТС по прямому назначению.

Для того чтобы определить оптимальный ресурс системы, необходимо найти минимум стоимости 1 ч работы РТС из выражения (2.48). Продифференцировав это выражение по $dt_{\text{пр}}$, получим уравнение

$$dC_{1\text{р}}(t_{\text{пр}})/dt_{\text{пр}} = 0. \quad (5.14)$$

Решение уравнения (5.14) относительно $t_{\text{пр}}$ принимаем за оптимальный средний ресурс системы $T_{\text{рс опт}}$.

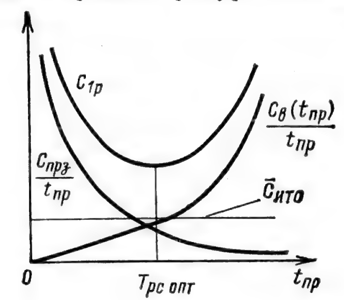


Рис. 5.4. Зависимость стоимости 1 ч работы системы от времени ее применения.

Пример 5.4. Известно, что $C_{\text{прз}} = \text{const}$, $C_{\text{ито}}(t_{\text{пр}}) = \bar{C}_{\text{ито}} t_{\text{пр}}$ и $C_{\text{в}} \times (t_{\text{пр}}) = \bar{C}_{\text{в}} a t^b_{\text{пр}}$, где $\bar{C}_{\text{ито}}$ — средняя стоимость обслуживания исправной системы и затраты на техническое обслуживание РТС; $\bar{C}_{\text{в}}$ — средняя стоимость одного восстановления; a и b —постоян-

ные величины, причем $b>1$. Определить $T_{\text{рс опт}}$.

Решение. 1. Пользуясь исходными данными, запишем выражение (2.48) в виде

$$C_{1\text{р}}(t_{\text{пр}}) = C_{\text{прз}}/t_{\text{пр}} + \overline{C}_{\text{ито}} + \overline{C}_{\text{в}} a t_{\text{пр}}^{b-1}. \quad (5.15)$$

2. Продифференцировав выражение (5.14) по $t_{\text{пр}}$ и приравняв результат нулю, получим

$$\frac{dC_{1\text{р}}(t_{\text{пр}})}{dt_{\text{пр}}} = -\frac{C_{\text{прз}}}{t^2_{\text{пр}}} + a\overline{C}_{\text{в}}(b-1)\, t_{\text{пр}}^{b-2} = 0. \quad (5.16)$$

3. Решив уравнение (5.16), найдем

$$T_{\text{рс опт}} = \sqrt{C_{\text{прз}}/a\overline{C}_{\text{в}}(b-1)}.$$

Полученный результат иллюстрируется рис. 5.4.

После выработки ресурса $T_{\text{рс опт}}$ РТС должна заменяться новой либо подвергаться капитальному ремонту, если его стоимость меньше стоимости новой системы.

5.5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ КАПИТАЛЬНЫХ РЕМОНТОВ

Экономическая целесообразность проведения капитального ремонта РТС может быть оценена с помощью коэффициента эффективности восстановительного ремонта [6]

$$K_{\text{э рем}} = (C_{\text{рем}} t_{\text{рс нв}})/(C_{\text{нв}} t_{\text{рс рем}}), \quad (5.17)$$

где $C_{\text{нв}}$ — величина затрат на производство и эксплуатацию системы за период, соответствующий назначенному ресурсу $t_{\text{рс нв}}$; $C_{\text{рем}}$ — величина затрат на проведение восстановительного ремонта и эксплуатацию системы за период, соответствующий назначенному послеремонтному ресурсу $t_{\text{рс рем}}$; $K_{\text{вр}}$ — коэффициент восстановления ресурса, равный

$$K_{\text{вр}} = t_{\text{рс рем}}/t_{\text{рс нв}}. \quad (5.18)$$

Из (5.17) видно, что выполнение восстановительного ремонта экономически целесообразно, когда $K_{\text{э рем}} < 1{,}0$.

Дальнейшее определение величин, входящих в выражение (5.17), производим на основе рекомендаций, разработанных доктором техн. наук проф. Волковым П. Н.

Обычно после проведения ремонта $t_{\text{рс рем}} \approx t_{\text{рс нв}}$. Однако бывают случаи, когда $K_{\text{вр}} = 0{,}8 \ldots 1{,}0$ и даже превышает единицу.

Затраты на производство (проведение ремонта) и последующую эксплуатацию определим по формулам

$$C_{\text{нв}} = C_{\text{прз}} + C_{\text{тр1}} + C_{\text{вэ1}} + C_{\text{изм1}} + C_{\text{эк1}}; \quad (5.19)$$

$$C_{\text{рем}i} = C_{\text{к рем}i} + C_{\text{дм}} + 2C_{\text{тр}i} + C_{\text{вэ}i} + C_{\text{изм}i} + C_{\text{эк}i}, \quad (5.20)$$

где $C_{\text{прз}}$ и $C_{\text{к рем}i}$ — стоимости производства и i-го капитального ремонта; $C_{\text{тр1}}$, $C_{\text{тр}i}$, $C_{\text{вэ1}}$ и $C_{\text{вэ}i}$ — стоимости транспортирования и ввода в эксплуатацию новой и отремонтированной системы; $C_{\text{дм}}$ — стоимость демонтажа перед отправкой в ремонт; $C_{\text{эк1}}$ и $C_{\text{эк}i}$ — стоимости эксплуатации новой и отремонтированной системы; $C_{\text{изм1}}$ и $C_{\text{изм}i}$ — затраты, обусловленные уменьшением стоимости системы из-за материального и морального износа.

Обозначим

$$C_{\text{и}} = C_{\text{прз}} + C_{\text{тр1}} + C_{\text{вэ1}}, \quad (5.21)$$

$$C_{\text{вр}i} = C_{\text{к рем}i} + C_{\text{дм}} + 2C_{\text{тр}i} + C_{\text{вэ}i}. \quad (5.22)$$

Тогда для ориентировочных расчетов стоимость капитального ремонта можно определить из выражения

$$C_{\text{вр}i}=(0{,}3\ \ldots\ 1{,}5)\,C_{\text{и}}. \tag{5.23}$$

Конкретное значение коэффициента зависит от технологии ремонтного процесса, его автоматизации, массовости и т. д.

Стоимость эксплуатации систем может быть записана в следующем виде:

$$C_{\text{эк}i}=K_{\text{ц эк}i}C_{\text{и}}. \tag{5.24}$$

Значение коэффициента стоимости эксплуатации $K_{\text{ц эк}i}$ задается из опыта эксплуатации на основе статистических данных.

Затраты, обусловленные уменьшением стоимости системы из-за материального и морального износа, в любой межремонтный период эксплуатации в общем случае определяются по формуле $C_{\text{изм}i}=C_{\text{нач}i}-$ $-C_{\text{кон}i}$, где $C_{\text{нач}i}$ и $C_{\text{кон}i}$ — начальная и остаточная стоимости в i-м межремонтном периоде эксплуатации.

Соответственно для первого периода эксплуатации (до первого капитального ремонта)

$$\begin{aligned} C_{\text{изм}1}&=C_{\text{изм нв}}=C_{\text{и}}-C_{\text{кон}1}=\\ &=C_{\text{и}}-[C_{\text{и}}(1-K_{01})]=C_{\text{и}}K_{01}, \end{aligned} \tag{5.25}$$

для второго межремонтного периода эксплуатации (между первым и вторым капитальными ремонтами)

$$\begin{aligned} C_{\text{изм}2}&=C_{\text{нач}2}-C_{\text{кон}2}=C_{\text{нач}2}K_{02}=\\ &=(C_{\text{кон}1}+C_{\text{вр}1})K_{02}=[C_{\text{и}}(1-K_{01})+C_{\text{вр}1}]K_{02}, \end{aligned} \tag{5.26}$$

где K_{01} и K_{02} — общий коэффициент износа в первом и втором периодах эксплуатации. Этот коэффициент запишем в виде

$$K_0=K_{\text{ф}}+K_{\text{м}}-K_{\text{ф}}K_{\text{м}}. \tag{5.27}$$

Здесь через $K_{\text{ф}}$ и $K_{\text{м}}$ обозначены коэффициенты материального и морального износов.

Значение коэффициента материального износа можно определить по приближенной формуле

$$K_{\text{ф}i}=\frac{C_{\text{нач}i}\dfrac{t_{\text{р}i}}{t_{\text{рс}i}}-\sum\limits_{s=1}^{r_{\text{в}}}C_{\text{в}s}\dfrac{t_{\text{рс}s}-t_{\text{р}s}}{t_{\text{рс}s}}}{C_{\text{нач}i}+\sum\limits_{s=1}^{r_{\text{в}}}C_{\text{в}s}}, \tag{5.28}$$

где $t_{\text{р}i}$ — наработка системы за рассматриваемый период; $r_{\text{в}}$ — число восстановлений к рассматриваемому моменту времени от начала эксплуатации; $C_{\text{в}s}$ — стоимость восстановления s-го элемента ($s=1, 2, \ldots,$ $\ldots, r_{\text{в}}$) или s-го вида ремонта (текущий, средний); $t_{\text{р}s}$ —наработка восстанавливаемого элемента к рассматриваемому моменту времени.

Обычно $t_{\text{рс}s}$ определить трудно, поэтому используем приближенную формулу

$$\sum_{s=1}^{r_{\text{в}}}C_{\text{в}s}\frac{t_{\text{рс}s}-t_{\text{р}s}}{t_{\text{рс}s}}\approx\sum_{s=1}^{r_{\text{в}}}\alpha_sC_{\text{в}s},$$

где α_s — коэффициент, характеризующий остаточную возобновленную стоимость на рассматриваемый момент эксплуатации.

Коэффициент морального износа определяется так:

$$K_{м} = 1 - \frac{Ц_{р\,нв}}{Ц_{р\,ст}} \frac{Ц_{и\,нв}}{Ц_{и\,ст}} \frac{Ц_{эк\,нв}}{Ц_{эк\,ст}}, \qquad (5.29)$$

где $Ц_{р\,нв}$ и $Ц_{р\,ст}$ — относительная стоимость выполнения задачи в режиме применения системы более совершенной и старой конструкции; $Ц_{и\,нв}$ и $Ц_{и\,ст}$ — удельные затраты на производство, транспортировку и ввод в эксплуатацию системы новой и старой конструкции; $Ц_{эк\,нв}$ и $Ц_{эк\,ст}$ — удельная стоимость эксплуатации систем новой и старой конструкции.

Удельные затраты, входящие в (5.29), можно выразить с помощью следующих зависимостей:

$$Ц_{р\,нв} = C_{р\,нв}/E_{нв}, \quad Ц_{р\,ст} = C_{р\,ст}/E_{ст};$$

$$Ц_{и\,нв} = C_{и\,нв}/t_{рс\,нв}, \quad Ц_{и\,ст} = C_{и\,ст}/t_{рс\,ст};$$

$$Ц_{эк\,нв} = C_{эк\,нв}/t_{рс\,нв}, \quad Ц_{эк\,ст} = C_{эк\,ст}/t_{рс\,ст},$$

где $C_{р\,нв}$ и $C_{р\,ст}$ — стоимость выполнения задачи в режиме применения новой и старой системы; $E_{нв}$ и $E_{ст}$ — показатели эффективности применения новой и старой системы; $t_{рс\,нв}$ и $t_{рс\,ст}$ — ресурс систем новой и старой конструкции.

Пример 5.5. Определить экономическую целесообразность капитальных ремонтов РТС, если известно: $C_{м} = 150\,000$ руб.;

$$K_{вр} = 0{,}8;\ K_{м1} = 0{,}4;\ K_{м2} = 0{,}6;$$

$$K_{ф1} = 0{,}16;$$

$$K_{ф2} = 0{,}2;\ K_{цэ1} = 0{,}6 \text{ и } K_{цэ2} = 0{,}65$$

(индексы 1 и 2 относятся соответственно к периодам до первого и второго капитальных ремонтов).

Решение. 1. По формуле (5.27) определим

$$K_{01} = K_{ф1} + K_{м1} - K_{ф1}K_{м1} =$$

$$= 0{,}16 + 0{,}4 - 0{,}16 \cdot 0{,}4 = 0{,}496,$$

$$K_{02} = K_{ф2} + K_{м2} - K_{ф2}K_{м2} =$$

$$= 0{,}2 + 0{,}6 - 0{,}2 \cdot 0{,}6 = 0{,}68.$$

2. По формуле (5.23) определим

$$C_{вр\,1} = 0{,}5 \cdot C_{и} = 0{,}5 \cdot 150\,000 =$$

$$= 75\,000 \text{ руб.}$$

3. По формуле (5.24) определим

$$C_{эк1} = K_{эц1}C_{и} = 0{,}6 \cdot 150\,000 =$$

$$= 90\,000 \text{ руб.}$$

$$C_{эк2} = K_{цэ1}C_{и} = 0{,}65 \cdot 150\,000 =$$

$$= 97\,500 \text{ руб.}$$

4. По формулам (5.25) и (5.26) определим

$$C_{изм1} = C_{и}K_{01} = 150\,000 \cdot 0{,}496 =$$

$$= 74\,400 \text{ руб.}$$

$$C_{изм2} = [C_{и}(1 - K_{01}) + C_{вр1}]K_{02} =$$

$$= [150\,000(1 - 0{,}496) + 75\,000] \cdot 0{,}68 =$$

$$= 102\,408 \text{ руб.}$$

5. По формулам (5.19) и (5.20) определим

$$C_{нв} = C_{и} + C_{изм1} + C_{эк1} =$$

$$= 150\,000 + 74\,400 + 90\,000 = 314\,400 \text{ руб.},$$

$$C_{рем2} = C_{вр1} + C_{изм2} + C_{эк2} =$$

$$= 75\,000 + 102\,408 + 97\,500 = 274\,908 \text{ руб.}$$

6. По формуле (5.17) вычислим

$$K_{э\,рем} = C_{рем2}/C_{нв}K_{вр} =$$

$$= 274908/314400 \cdot 0{,}8 = 1{,}08.$$

Так как $K_{э\,рем} > 1{,}0$, то проведение капитального ремонта экономически нецелесообразно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Автоматизированные** системы управления. Основные положения. Термины и определения. ГОСТ 19675—74, М., Издательство стандартов, 1974.
2. **Агаджанов П. А., Горшков Б. М., Смирнов Г. Д.** Основы радиотелеметрии. М., Воениздат, 1971.
3. **Астафьев А. В.** Окружающая среда и надежность радиотехнической аппаратуры. М., «Энергия», 1965.

4. **Барзилович Е. Ю., Каштанов В. А.** Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. М., «Сов. радио», 1971.
5. **Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.** Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. М., «Наука», 1964.
6. **Волков П. Н., Аристов А. И.** Ремонтопригодности машин. М., Комитет стандартов, 1971.
7. **Духон Ю. И., Ильинский Н. Н.** Средства управления летательными аппаратами. М., Воениздат, 1972.
8. **Кантор А. В.** Аппаратура и методы измерений при испытаниях ракет. М., Оборонгиз, 1963.
9. **Качество** продукции. Основные понятия управления. Термины и определения. ГОСТ 17341—71. М., Издательство стандартов, 1971.
10. **Козлов Б. А., Ушаков И. А.** Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М., «Сов. радио», 1975.
11. **Колегаев Р. Н.** Определение оптимальной долговечности технических систем. М., «Сов. радио», 1967.
12. **Космические** радиотехнические комплексы. Под ред. С. И. Бычкова. М., «Сов. радио», 1967. Авт.: С. И. Бычков, Д. П. Лукьянов, Е. Н. Назимок, П. В. Оленюк, Н. К. Сергеев, В. С. Шебшаевич, Ю. А. Юрков.
13. **Космические** траекторные измерения. Под ред. П. А. Агаджанова, В. Е. Дулевича, А. А. Коростелева. М., «Сов. радио», 1969.
14. **Кулаков Н. Н., Загоруйко А. О.** Методы оценки повышения надежности технических изделий по технико-экономическим показателям. Новосибирск, «Наука», СО, 1969.
15. **Кузьмин Ф. И.** Задачи и методы оптимизации показателей надежности. М., «Сов. радио», 1972.
16. **Малинский В. Д.** Контроль и испытания радиоаппаратуры. М., «Энергия», 1970.
17. **Методика** выбора номенклатуды нормируемых показателей надежности технических устройств. М., ВНИИС, 1970.
18. **Методика** выбора норм надежности промышленных изделий. М., ВНИИС, 1971.
19. **Методика** выбора показателей надежности сложных технических систем. М., ВНИИС, 1972.
20. **Надежность** в технике. Термины и определения. ГОСТ 13377—75. М., Издательство стандартов, 1975.
21. **Надежность** в технике. Расчет показателей безотказности восстанавливаемых объектов (без резервирования). ГОСТ 20237—74. М., Издательство стандартов», 1974.
22. **Надежность** в технике. **Расчет** показателей безотказности невосстанавливаемых объектов (без резервирования). ГОСТ 19460—70. М., Издательство стандартов, 1970.
23. **Надежность** изделий машиностроения. Система сбора и обработки информации. Требования к содержанию форм учета наработок, повреждений и отказов. ГОСТ 17526—72, М., Издательство стандартов, 1972.
24. **Основы** эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры. Под ред. В. Ю. Лавриненко. М., «Высшая школа», 1968. Авт.: А. К. Быкадоров, Л. И. Кульбак, В. Ю. Лавриненко, И. Н. Рысейкин, В. Л. Тихомиров.
25. **Павленко К. И.** Надежность радиоэлектронной аппаратуры при циклическом и непрерывных режимах использования. М., «Сов. радио», 1971.
26. **Проников А. С.** Основы надежности и долговечности машин. М., Издательство стандартов, 1969.
27. **Ремонтопригодность** радиоэлектронной аппаратуры. Пер. с англ. Под ред. О. Ф. Пославского. М., «Сов. радио», 1964.
28. **Система** технического обслуживания и ремонта техники. Ремонтопригодность. Состав общих требований. ГОСТ 19152—73. М., Издательство стандартов, 1973.
29. **Система** технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. ГОСТ 18322—73. М., Издательство стандартов, 1974.
30. **Теория** и практика эксплуатации радиолокационных систем. Под ред. С. М. Латинского. М., «Сов. радио», 1970. Авт.: С. М. Латинский, В. И. Шарапов, С. П. Ксёнз, С. С. Афанасьев.
31. **Фокин Ю. Г.** Надежность при эксплуатации технических средств. М., Воениздат, 1970.
32. **Цветков А. Г.** Принципы количественной оценки эффективности радиоэлектронных средств. М., «Сов. радио», 1971.
33. **Широков А. М.** Надежность радиоэлектронных устройств, М., «Высшая школа», 1972.
34. **Шишонок Н. А., Репкин В. Ф., Барвинский Л. Л.** Основы надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники. М., «Сов. радио», 1964.
35. **Эксплуатационная** и ремонтная документация. ГОСТ 2.601—68...2.605—68. М., Издательство стандартов, 1969.

Раздел II

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ, РЕМОНТ И ХРАНЕНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Для поддержания радиотехнической системы в работоспособном состоянии или возвращения ее в это состояние при появлении отказа или неисправности проводится комплекс мероприятий, называемых техническим обслуживанием. Эти мероприятия включают: контроль технического состояния систем, их профилактическое обслуживание, ремонт и хранение.

В данном разделе изложены наиболее целесообразные пути и методы технического обслуживания РТС. Рассмотрены вопросы, связанные с взаимодействием человека и техники во время ее обслуживания. Акцентируется внимание на важность эксплуатационно-ремонтной документации для правильной эксплуатации техники.

Глава 6

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РТС

6.1. НЕОБХОДИМОСТЬ КОНТРОЛЯ И ЕГО ЗАДАЧИ

Своевременное выявление и устранение причин отказов РТС приводит к улучшению количественных характеристик надежности. Поэтому контроль является одним из эффективных путей повышения надежности РТС.

Основной задачей контроля является установление факта удовлетворяет ли состояние контролируемого объекта заданным требованиям? Следовательно, операции контроля сводятся к сопоставлению некоторых свойств объекта с заданными, в результате чего делается заключение об объекте, в простейшем случае типа «плохо — хорошо» или «годен — негоден».

Под *объектом контроля* понимают радиотехнический комплекс (систему или ее часть), информацию о техническом состоянии которого необходимо иметь в процессе эксплуатации и производства [15]. Для оценки технического состояния РТС контролю подвергаются количественные и качественные характеристики ее свойств, которые называются *контролируемыми признаками* (параметрами).

Требования к объекту контроля могут быть представлены в виде перечня определенных свойств и значений контролируемых параметров с указанием полей допусков.

Контролем называют [36] процесс установления соответствия между состоянием объекта контроля и заранее заданными допусками путем восприятия сигналов о значениях контролируемых

параметров, сопоставления значений параметров с допусками, формирования и выдачи суждения о результате, а также проведения подготовительных и заключительных операций по подготовке объекта и системы контроля к проверкам и приведение объекта контроля в рабочее состояние.

Следует различать понятия контроля и измерения. *Измерение* — нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств (средств измерений). Полученная информация содержит результат сравнения определяемой величины с однородной величиной, принятой за единицу меры, и выражается числом, совокупностью чисел или графиком.

При контроле получают некоторое суждение, дающее представление о состоянии контролируемого объекта. Контроль включает в себя измерения. В процессе контроля результат измерения, выраженный числом, сравнивается с допустимыми значениями и выносится суждение о состоянии контролируемого объекта: находятся ли контролируемые параметры в пределах заданных полей допусков, работоспособен ли объект или он неисправен. Кроме того, при контроле РТС анализируются качественные признаки ее свойств, например, состояние лакокрасочных покрытий, смазки и т. п. Изделия или материал, применяемые для осуществления контроля, называются *средствами контроля*.

В практике эксплуатации РТС во многих случаях недостаточно установления вида состояния аппаратуры. Для восстановления работоспособности РТС необходимо выявить элементы и узлы, послужившие причиной отказа. Такое направление развития методов и средств контроля называют технической диагностикой [3, 5].

Контроль работоспособности РТС осуществляется *системой контроля*, под которой понимают совокупность средств контроля (контрольно-измерительной аппаратуры, средств передачи измерительной информации, счетно-решающих и логических устройств, а также устройств регистрации) и исполнителей, взаимодействующих с РТС по правилам, установленным соответствующей документацией. Система контроля может быть автоматизированной (при частичном участии человека) и автоматической (без участия человека). Результаты контроля используются потребителем информации, в качестве которого могут выступать оператор (человек), система сбора статистических данных или автомат, восстанавливающий объект.

Качество контроля характеризуется, в частности, *контролепригодностью* РТС, под которой понимают ее приспособленность к проведению контроля. Контролепригодность зависит не только от приспособленности объекта к контролю, но и от качества системы контроля.

Чтобы произвести контроль РТС, необходимо выполнить ряд операций с целью подготовки аппаратуры и системы контроля, проведения измерений, сопоставления их результатов с установленными документацией допусками, получения заключения о техническом состоянии, работоспособности аппаратуры, месте и причине ее неисправности, проведения заключительных операций по приведению аппаратуры и системы контроля в исходное состояние, соответствующее состоянию до контроля. Совокупность этих операций составляет процесс контроля.

6.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ

Для оценки качества процесса контроля могут быть использованы следующие характеристики [20, 30]: коэффициенты достоверности контроля и глубины контроля, время контроля и др. Рассмотрим эти характеристики.

Достоверность контроля. В качестве количественной характеристики достоверности контроля Θ удобно принять величину

$$\Theta = P_{\text{и}}/P_{\text{д}}, \qquad (6.1)$$

где $P_{\text{и}}$ — вероятность того, что РТС после проведения контроля окажется действительно исправной; $P_{\text{д}}$ — вероятность допуска РТС после проведения контроля к применению.

Достоверность контроля зависит от следующих значений вероятностей [30]: P_1 — исправного состояния объекта контроля перед проверками; P_2 — введения неисправностей в объект контроля при контроле: α — принятия исправного объекта за неисправный; β — принятия неисправного объекта контроля за исправный; P_3 — исправного состояния системы контроля перед проверками; P_4 — исправного состояния системы контроля в процессе ее применения; P_5 — выполнения ремонта неисправной системы контроля за установленное время.

Для облегчения решения задачи по определению достоверности контроля построим граф принятия решения при контроле с указанием

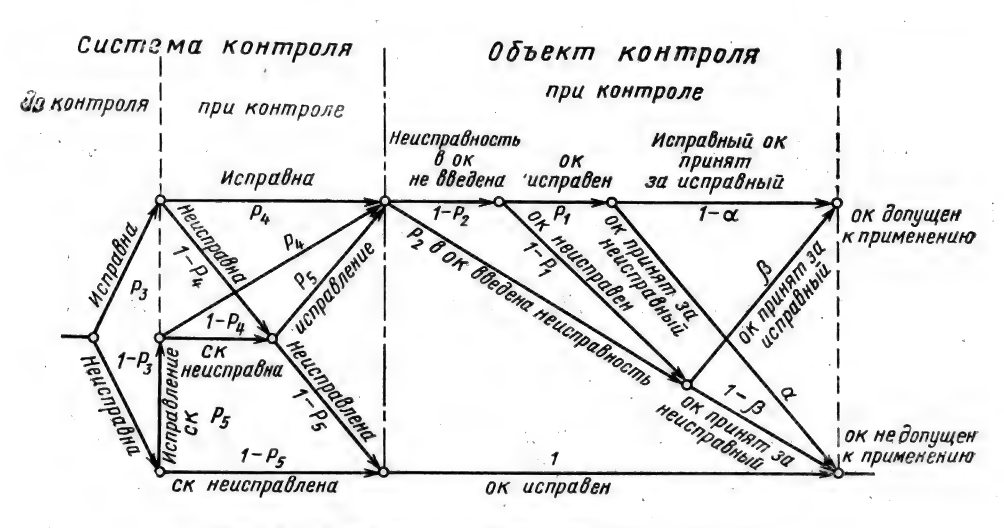


Рис. 6.1. Граф принятия решения при контроле.

перечисленных вероятностей (рис. 6.1). На графе обозначено: узлами — состояние объекта контроля или системы контроля, ветвями — вероятности перехода объекта контроля или системы контроля из одного состояния в другое.

Граф, на котором указаны направления каждого ребра, называют ориентированным.

Рассмотрим случай независимых событий.

Из логических рассуждений и приведенного графа следует, что вероятность допуска объекта контроля к применению после цикла контроля определяется произведением вероятностей

$$P_{\text{д}} = P_{\text{ск}} P_{\text{ок}}, \tag{6.2}$$

где $P_{\text{ск}}$ — вероятность исправного состояния системы контроля в течение всего процесса контроля с учетом времени ее ремонта; $P_{\text{ок}}$ — вероятность исправного состояния объекта контроля и возникновения ошибок при контроле. Вероятность $P_{\text{ск}}$ равна сумме вероятностей положительных исходов при возникновении различных ситуаций с системой контроля (см. рис. 6.1)

$$P_{\text{ск}} = P_3P_4 + P_3P_5(1-P_4) +$$
$$+ (1-P_3)(1-P_4)P_5^2 + (1-P_3)P_4P_5.$$

После преобразования получим

$$P_{ск}=[P_3+(1-P_3)P_5][P_4+(1-P_4)P_5]. \qquad (6.3)$$

Вероятность $P_{ок}$ будет равна (см. рис. 6.1)

$$P_{ок}=(1-P_2)P_1(1-\alpha)+(1-P_2)(1-P_1)\beta+P_2\beta. \qquad (6.4)$$

После преобразования имеем

$$P_{ок}=(1-P_2)[P_1(1-\alpha)+(1-P_1)\beta]+P_2\beta. \qquad (6.5)$$

В результате вероятность того, что объект контроля после цикла контроля будет допущен к режиму применения, будет равна

$$P_д=[P_3+(1-P_3)P_5][P_4+(1-P_4)P_5]\{(1-P_2)[P_1(1-\alpha)+$$
$$+(1-P_1)\beta]\}+P_2\beta. \qquad (6.6)$$

Аналогично рассуждая, запишем выражение для вероятности того, что РТС после цикла контроля окажется действительно исправной:

$$P_и=[P_3+(1-P_3)P_5][P_4+(1-P_4)P_5]\times$$
$$\times(1-P_2)(1-\alpha)P_1. \qquad (6.7)$$

Из выражений (6.6) и (6.7) получим формулу для достоверности контроля

$$\Theta=\frac{P_1(1-P_2)(1-\alpha)}{(1-P_2)[P_1(1-\alpha)+(1-P_1)\beta]+P_2\beta}. \qquad (6.8)$$

Как видно из полученного выражения, достоверность контроля зависит от безотказности объекта контроля в процессе предшествующего хранения, а также от величин, характеризующих степень уверенности в результатах проверки. Кроме того, на достоверность контроля влияют вероятности введения неисправностей в контролируемый объект в процессе контроля.

При принятии решения о применении радиотехнических средств возникает задача целесообразности проведения контроля.

Для количественной оценки целесообразности контроля вводят соответствующий коэффициент $K_{цк}$, который показывает, во сколько раз повышается уверенность в исправном состоянии системы при ее контроле по сравнению со случаем, когда система не контролируется [30].

В случае отсутствия контроля вероятность исправности объекта будет

$$P_и=P_1. \qquad (6.9)$$

Эта вероятность не что иное, как «достоверность» исправного состояния аппаратуры неконтролируемого объекта $\Theta_{бк}$. Так как вероятности допуска объекта к применению $P_д=1$, то

$$\Theta_{бк}=P_и/P_д=P_1. \qquad (6.10)$$

Контроль работоспособности всегда проводится с целью повышения уверенности в исправном состоянии контролируемого объекта, а также с целью приведения его в исправное состояние при отказе. Система контроля будет полезной при $\Theta>\Theta_{бк}$. При невыполнении этого условия система контроля уменьшает степень уверенности в исправном состоянии объекта контроля и, кроме того, увеличиваются затраты на эксплуатацию.

Это условие может служить оценкой целесообразности примененной системы контроля или введения контрольных мероприятий в процесс подготовки к применению РТС. Поэтому коэффициент целесообразности контроля $K_{цк}$ равен отношению достоверностей контролируемого Θ и неконтролируемого объекта $\Theta_{бк}$ [30]:

$$K_{цк}=\Theta/\Theta_{бк}. \qquad (6.11)$$

Очевидно, если $K_{цк}>1$, контроль целесообразен, а при $K_{цк}<1$ — контроль нецелесообразен и от него необходимо отказаться.

Из выражений (6.8) и (6.10) получим [30]

$$K_{цк}=(1-P_2)(1-\alpha)/(1-P_2)\times$$
$$\times[P_1(1-\alpha)+(1-P_1)\beta]+P_2\beta. \qquad (6.12)$$

На основании выражения (6.12) построен график зависимости $K_{цк}$ от безотказности P_1 проверяемой аппаратуры (рис. 6.2).

Из графика видно, что для некоторой совокупности объекта контроля, системы контроля, личного состава, характеризующихся параметрами α, β, P_2, P_3 и P_4, в зависимости от условий и сроков хранения аппаратуры существует две области (*1* и *2*). В первой заштрихованной области проведение контроля целесообразно, а во второй — нецелесообразно.

Границей этих областей является условие $K_{цк}=1$. Отсюда необходимое условие целесообразности контроля запишем в виде

$$P_1<P_{1пр}=[(1-\alpha)(1-P_2)-\beta]/(1-P_2)(1-\alpha-\beta). \qquad (6.13)$$

Это условие также применимо к решению задачи о введении в процесс подготовки контроля конкретного параметра или отдельного устройства РТС.

Оценка целесообразности контроля может быть определена на основании учета материального ущерба при выполнении задачи РТС из-за отказа от контрольных мероприятий. При этом применяется понятие стоимостного коэффициента целесообразности контроля, определяемого из следующего соотношения:

$$K_{цкс}=(1-P_{ущ})C_{ущ}/(C_{кх}-\Delta C_{к}), \qquad (6.14)$$

где $C_{ущ}$ — стоимость ущерба при выполнении задачи РТС из-за отказа от контрольных мероприятий; $C_{кх}$ — стоимость контроля аппаратуры в режиме хранения и ожидания; $\Delta C_{к}$ — увеличение стоимости подготовки при введении системы контроля и контрольных мероприятий; $P_{ущ}$ — вероятность невозникновения материального ущерба, численно равная вероятности безотказного хранения РТС за период с момента последнего контроля при хранении до момента начала использования.

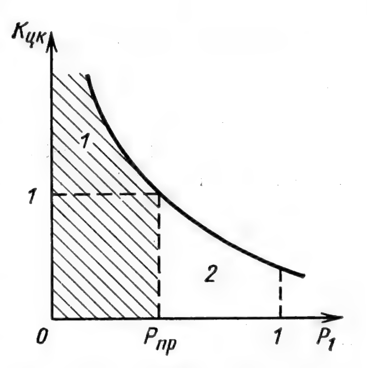


Рис. 6.2. График зависимости коэффициента целесообразности контроля от безотказности проверяемой аппаратуры.

Применение стоимостного коэффициента целесообразности контроля дает более общий подход к необходимости введения контрольных мероприятий, но определение его величины затруднено в связи со сложностью практического определения затрат.

Коэффициент глубины контроля. При решении различных задач контроля необходимо иметь сведения о различном количестве параметров. Так, например, для оценки работоспособности аппаратуры достаточно иметь сведения о значениях определяющих параметров, которые зависят от других параметров и являются их функцией (интегральной оценкой).

При поиске места неисправности важно знать не только значения определяющих параметров аппаратуры в целом, но и параметры отдельных функциональных частей элементов, устройств и функциональных групп или сигналов в отдельных сечениях.

Для решения всех задач по определению технического состояния и характера восстановления всех элементов аппаратуры необходимо контролировать некоторое предельное число параметров. Для оценки степени использования предельного числа параметров аппаратуры при решении частных задач контроля введено понятие коэффициента глубины контроля.

Коэффициентом глубины контроля называется отношение числа контролируемых параметров $N_к$, необходимых для выявления i состояния РТС при решении конкретной задачи контроля, к предельному числу параметров N, определяющих все ее состояния [20]:

$$K_{гк}=N_к/N, \tag{6.15}$$

$\{N_к\}\subset\{N\}$ — множество параметров $N_к$ содержится в множестве N. Работоспособность РТС обычно характеризуется несколькими определяющими параметрами, с помощью которых можно оценить возможность выполнения заданных функций системой в целом. В этом случае контролируется небольшое число параметров. Поэтому величина коэффициента глубины контроля будет незначительной. При поиске места отказа и его причины необходима детальная информация о состоянии отдельных элементов и узлов. В этом случае необходимо контролировать большое число параметров, следовательно, коэффициент поиска отказов будет иметь величину бóльшую, чем коэффициент глубины контроля.

При прогнозировании работоспособности РТС в связи с необходимостью знать не только состояние элементов и узлов, но и законы распределения и изменения параметров во времени, нужно иметь еще большее количество информации. Поэтому численное значение коэффициента глубины контроля при прогнозировании отказов будет наибольшим.

Время контроля является наиболее удобной характеристикой процесса контроля. Оно зависит от приспособления объекта и системы контроля к выполнению контрольных мероприятий, т. е. от контролепригодности радиотехнической системы, глубины и методов контроля, степени автоматизации процесса контроля, квалификации обслуживающего персонала.

В реальных условиях время контроля является случайной величиной и как всякая случайная величина оно может быть охарактеризовано законом распределения $f_к(t)$ или его числовыми характеристиками, важнейшими из которых являются среднее время контроля $T_к$ и дисперсия времени контроля $\sigma^2_к$. Знание закона распределения времени контроля позволяет определить и другие числовые характеристики.

По закону распределения времени контроля может быть определена вероятность выполнения контрольных операций за заданное время:

$$P_{к}(t_{к}) = \int_{0}^{t_{к}} f_{к}(t)\, dt. \qquad (6.16)$$

Кроме перечисленных характеристик, для оценки процесса контроля могут использоваться и другие: коэффициент стоимости контроля, коэффициент эксплуатационно-технического совершенства процесса контроля и т. п.

6.3. ВЫБОР КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

Количество контролируемых параметров РТС определяется задачами контроля. Выбор параметров для контроля РТС в настоящее время основывается на отборе параметров физических процессов, протекающих в РТС, и параметров сигналов, проходящих по цепям РТС. Параметры сигналов изменяются под воздействием физических процессов, а по величинам этих изменений судят о работоспособности РТС.

Различают группы параметров, характеризующих качество выполнения РТС своих функций:

— параметры входных и выходных сигналов (амплитуда, длительность импульсов, несущая частота сигналов, их мощность и т. п.);

— параметры физических процессов (изменение частоты и фазы сигнала, пульсации напряжения источников питания и др.);

— параметры, не несущие запаса энергии (коэффициент шума, коэффициент стоячей волны, входные и выходные сопротивления и др.);

— передаточные и переходные функции.

Современные РТС имеют 100 ... 1500 и более контролируемых параметров, а системы контроля по сложности и занимаемому объему могут быть соизмеримы, а иногда и превосходят контролируемую аппаратуру.

При выборе контролируемых параметров предполагается теоретическое и экспериментальное исследования, на основании которых определяют общее количество возможных контролируемых параметров, номинальные их значения и дисперсии, а также дисперсии, характеризующие влияние отдельных факторов, элементов и процессов на каждый параметр.

Выбор необходимого количества контролируемых параметров можно произвести на основе теории информации.

Состояние объекта контроля в данный момент времени [20] определяется значениями параметров $q_1, q_2, \ldots, q_n$, являющихся оценкой его качества. До начала контроля неопределенность знаний обслуживающего персонала о состоянии контролируемого объекта определяется энтропией объекта. В случае независимости параметров друг от друга значение этой энтропии будет равно

$$H_0 = \sum_{i=1}^{n} I(q_i, S), \qquad (6.17)$$

где $I(q_i, S)$ — количество информации, содержащееся в параметре q_i о S-м состоянии объекта контроля. Каждый параметр несет в себе определенное количество информации I о состянии S контролируемого объекта:

$$I(q_i, S) = H(S/q_{i-1}) - H(S/q_i), \qquad (6.18)$$

где $H(S/q_{i-1})$ — условная неопределенность состояния объекта до контроля параметра q_i; $H(S/q_i)$ — условная неопределенность состояния объекта при условии знания параметра q_i.

Для облегчения решения задачи необходимо из всей совокупности параметров выбрать наименьшее количество независимых параметров $N_{к}$, которые несут необходимую информацию о состоянии объекта контроля.

Суммарное количество информации по выбранным параметрам должно быть равно или близко к исходной неопределенности состояния объекта

$$\sum_{i=1}^{N_k} I(q_i, S) = H_0(S). \qquad (6.19)$$

При выполнении этого условия состояние контролируемого объекта определится однозначно. Последовательность контроля параметров необходимо выбирать из условия убывания информации, содержащейся в каждом из параметров о состоянии контролируемого объекта.

При выборе параметров необходимо учитывать, что после того, как станет известен параметр q_i, неопределенность знаний обслуживающего персонала о состоянии контролируемого объекта уменьшится и станет равной $H(S/q_i)$. Значение этой неопределенности необходимо принимать при выборе следующего параметра q_i+1, т. е.

$$I(q_1, S) = H_0(S) - H(S/q_1), \qquad (6.20)$$

$$I(q_2, S) = H(S/q_1) - H(S/q_1, q_2), \qquad (6.21)$$

$$I(q_N, S) = H(S/q_1, q_2, \dots, q_{N-1}) - H(S/q_1, q_2, \dots, q_N). \qquad (6.22)$$

Расчет количества информации при контроле для сложных систем является трудной задачей, которая может быть решена только с помощью ЦВМ.

Более просто задача решается путем построения графа выходов системы [30], на основании которого находится наименьшее внешне устойчивое множество в графе выходов. При построении графа выходов каждый внешний выход системы принимается за вершину ориентированного графа. Каждая пара вершин соединяется дугой, если внешний выход устройства является входом другого устройства, имеющего свой внешний выход.

Внешне устойчивое множество — это такое множество вершин графа, в которое заходят непосредственно (или проходят через другие вершины) дуги из всех остальных вершин, не принадлежащих этому множеству.

Параметры выходов системы, принадлежащих внешне устойчивому множеству, полностью характеризуют состояние системы, и их количество будет минимальным.

Пример 6.1. Имеем систему (рис. 6.3,*а*), состоящую из *8* устройств (модулей, плат, блоков, шкафов), каждое из которых имеет вход ($x_1, \dots, x_8$) и выход ($y_1, \dots, y_8$). Построим для нее граф выходов.

Решение. Граф будет содержать *8* вершин по числу выходов системы. Точки, соответствующие вершинам графа, разместим в произвольном порядке на листе бумаги. Затем построим дуги (рис. 6.3,*б*). Например, для устройства *1* выход соединен со входами устройств *2* и *5*. На графе соединяем вершину *1* с вершинами *2* и *5* линиями и обозначаем стрелкой направление прохождения сигнала. Необходимо также изобразить замкнутую дугу у вершины *1*,

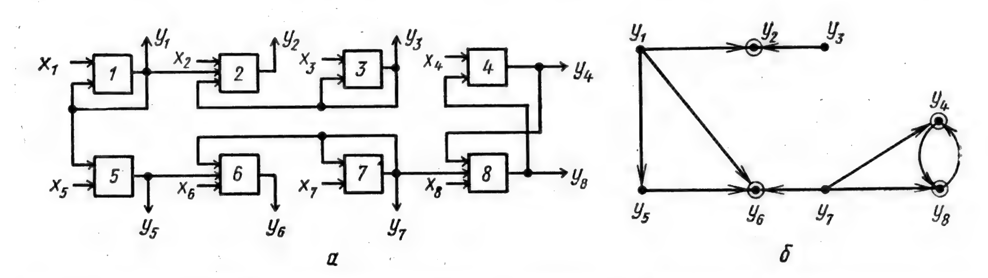


Рис. 6.3. Выбор минимального количества параметров для контроля работоспособного состояния РТС:

а — структурная электрическая схема РТС; *б* — граф выходов РТС.

обозначающую обратную связь блока *1*, но так как при наличии обратной связи в устройстве его состояние может характеризовать любой параметр, в том числе и x_1, то на графе замкнутую дугу изображать не имеет смысла. Кроме того, вершину *1* необходимо соединить с вершиной *6*, так как выход устройства *1* подключен к входу последовательно соединенных устройств *5* и *6*.

Аналогично строим дуги и для других вершин графа. Граф выходов для рассматриваемой системы приведен на рис. 6.3,*б*.

Выбираем минимальное количество параметров для контроля работоспособности (внешне устойчивое множество), руководствуясь следующими правилами.

Размыкаем вершины *4* и *8*, соединенные двумя дугами. Из всего множества вершин (в нашем примере *8*) выбираем только те, в которые «втекают» дуги. Для нашего примера такими вершинами являются y_2, y_6, y_4 и y_8. Вершины *4* и *8* связаны между собой, поэтому выбор выходов *4* или *8* для контроля равноценен. Таким образом, контроль работоспособности системы может осуществляться контролем параметров сигналов на выходах *2, 4, 6* или *2, 6, 8*. При выборе для контроля выходов *4* или *8* необходимо учитывать эффективность контроля. В условиях эксплуатации наиболее удобным критерием эффективности является время контроля. Целесообразно для контроля выбрать тот выход, при контроле которого затрачивается минимальное время.

При диагностике состояния (поиска отказов) параметры выбирают с расчетом поиска неисправности на заданном уровне (блока, платы, модуля, отдельного функционального элемента или детали). При этом необходимо обеспечить контроль параметров входных и выходных сигналов устройств заданного уровня поиска неисправности.

6.4. ДОПУСКИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Допуском называют установленные опытом или расчетом границы для значений параметра изделия, при которых оно способно выполнять заданные функции, сохраняя свои технические показатели в течение требуемого времени в определенных условиях [18].

Значение допуска зависит от стадий разработки аппаратуры. В соответствии с терминологией АН СССР различают следующие виды допусков: арбитражный, производственный, эксплуатационный и ремонтный. Значения этих допусков устанавливаются техническими условиями: стандартами — для арбитражного допуска; производственно-технологической документацией — для производственного; инструкцией по эксплуатации — для эксплуатационного; техническими условиями на ремонт — для ремонтного.

Все эти виды допусков необходимы для обеспечения основных функциональных показателей РТС исходя из ее назначений и условий применения.

Эксплуатационным допуском называют установленные опытным или расчетным путем границы значений параметра, в пределах которых устройство с заданной вероятностью в течение определенного времени при конкретных условиях эксплуатации будет выполнять возложенные на него функции [18].

Различают следующие характеристики поля допуска на параметр (рис. 6.4) [18]: $Д_в$, $Д_н$ — верхняя и нижняя границы поля допуска; Δ, Δ_l — координаты середины поля допуска и поля рассеяния относительно номинального значения параметра $q_{ном}$, $\Delta = q_c - q_{ном}$, $\Delta_l = q_l - q_{ном}$; δ — половина поля допуска; $q_{ном}$, $A_в$, $A_н$ — номинальное, практическое наибольшее и наименьшее значения параметра q; q_c, q_l — значения параметра, соответствующие серединам полей допуска и рассеяния параметра; $l = (A_в - A_н)/2$ — половина поля рассеяния параметра; γ, γ_δ, γ_l — координаты математического ожидания параметра m_q относитель-

но номинального значения $q_{\text{ном}}$, середины поля допуска $q_{\text{с}}$ и середины поля рассеяния параметра q_l:

$$\gamma = m_q - q_{\text{ном}},$$

$$\gamma_\delta = m_q - q_{\text{с}} = M_q - q_{\text{ном}} - \Delta,$$

$$\gamma_l = m_q - q_{\text{ном}} - \Delta_l.$$

В зависимости от положения середины поля допуска относительно номинального значения параметра различают двусторонние (имеющие определенное конечное значение половины поля допуска δ) и односторонние допуски. Для одностороннего допуска задается одна из границ $Д_{\text{в}}$ или $Д_{\text{н}}$.

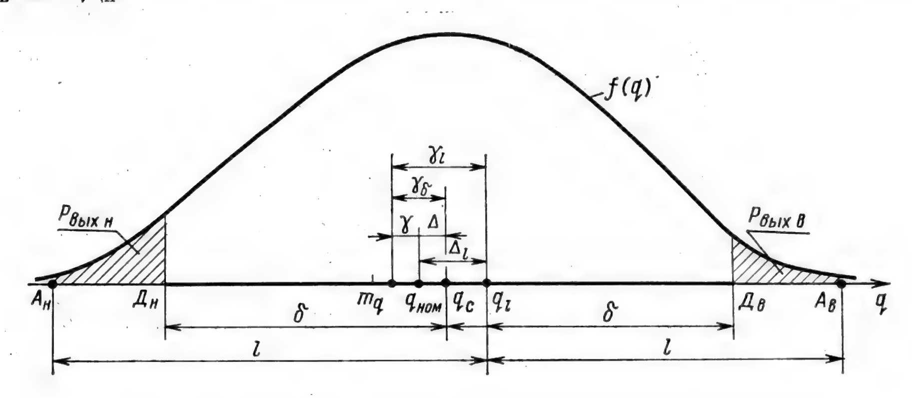


Рис. 6.4. Характеристика поля допуска на контролируемый параметр.

В радиопромышленности на параметры схемных элементов даются симметричные допуски, выраженные в процентах от номинальных значений. Поэтому за начало координат при определении границ поля допуска, если не учитывать влияния старения элементов и температуры, можно было бы принять середину поля допуска, т. е. номинальное значение параметра. Допуск определяет максимальное отклонение конкретного значения параметра от номинального его значения. Величина поля допуска равна удвоенному значению δ. При назначении δ исходят из характеристики σ_q закона распределения параметра $\delta = k\sigma_q$, где σ_q — среднеквадратическое отклонение значения параметра от его номинального значения; k — коэффициент, зависящий от вида закона распределения контролируемого параметра.

Для нормального закона распределения параметра $k=3$. При этом вероятность нахождения параметра внутри поля допуска равна 0,997.

Эксплуатационные допуски выходных параметров РТС выбираются из условия ее работоспособности.

Они накладывают ограничения на производственные, температурные допуски и на допуски старения.

Количественные значения параметров эксплуатационных допусков определяются при проектировании аппаратуры на основании точностных характеристик, заданных в технических условиях на систему в целом. Значения эксплуатационных допусков контролируемых параметров РТС приводятся в «Инструкции по эксплуатации РТС» [35].

Выбор эксплуатационных допусков контролируемых параметров подробно рассматривается в [18].

6.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ КОНТРОЛЕ

Знания требуемых точностей измерений параметров РТС при ее контроле являются необходимым условием правильного выбора контрольноизмерительной аппаратуры.

При использовании системы контроля могут появиться два вида ошибок: необнаруженные отказы и ложные отказы. Первый приводит к невыполнению задачи, второй — к увеличению времени простоя РТС.

Как правило, оба вида ошибок возникают вследствие неправильного выбора значений погрешности измерения и поля допуска [2]. Из-за погрешностей измерительных приборов поле допуска должно выбираться по значению меньшим, чем разность предельных значений контролируемого параметра, определяемых из условий работоспособности РТС. При невозможности устранения этих ошибок необходимо минимизировать вероятности их появления.

Распределение плотности вероятностей для нормального распределения результата измерения a и контролируемого параметра q запишется в виде [2]:

$$f_1(a) = \exp\left[-(a-q)^2/4\sigma_1^2\right]/\sqrt{2\pi}\sigma_1, \tag{6.23}$$

где σ_1 — среднеквадратическое значение погрешности измерения; a — результат измерения; q — значение контролируемого параметра, относительно которого центрирована функция плотности вероятностей $f_1(a)$ измеряемой величины;

$$f_2(q) = \exp\left[-(A_в - A_н \pm 2\Delta_0 - - 2q)^2/4\sigma_2^2\right]/\sqrt{2\pi}\sigma_2, \tag{6.24}$$

где σ_2 — среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра; q — значение контролируемого параметра; Δ_0 — отклонение центра распределения плотности вероятности контролируемого параметра от середины поля допуска $(Д_в—Д_н)/2$.

Ложный отказ возникает в случае, если значение контролируемого параметра находится внутри $A_в$, $A_н$, а результат измерения — за пределами поля допуска $Д_в$, $Д_н$ (рис. 6.5).

Площадь под кривой распределения плотности вероятностей результата измерения $f_1(a)$, заштрихованная на рисунке, будет равна вероятности ложных отказов α.

Из рис. 6.5 видно, что при уменьшении погрешности σ_1 измерения и увеличении поля допуска δ вероятность ложных отказов уменьшается.

Когда контролируемый параметр находится вне интервала допустимых значений $A_в$, $A_н$ и функция распределения плотности вероятности $f_1(a)$ центрирована относительно контролируемого параметра, то площадь под кривой внутри интервала $Д_в$, $Д_н$ равна вероятности необнаруженного отказа β.

Из рис. 6.5 видно, что вероятность необнаруженного отказа уменьшается при уменьшении погрешности измерений σ_1 и величины поля допуска δ.

На рис. 6.6 приведены зависимости вероятностей ложного и необнаруженного отказов при различных соотношениях величин σ_2, σ_1 (среднеквадратического отклонения измеряемого параметра и результата его измерения) и ε (запаса поля допуска по отношению к верхнему $A_в$ и нижнему $A_н$ допустимым значениям параметра).

Как видно из графиков, изменение величины поля допуска сильнее влияет на величину β, чем на α. При изменении ε от 0 до $3\sigma_1$ вероятность необнаруженного отказа β уменьшается в 1000 раз. При изменении погрешности измерения σ_1 в 15 раз вероятность необнаруженного отказа β изменяется только в 5 раз. При тех же изменениях ε вероятность ложного отказа α увеличивается в 10 раз, а при изменении погрешности измерения σ_1 в 15 раз α изменяется в 60 раз.

Таким образом, для уменьшения значения вероятности необнаруженных отказов β наиболее целесообразно уменьшить величину поля допуска δ при том же значении величины погрешности измерения. Уменьшение вероятности ложных отказов более эффективно за счет уменьшения величины погрешности измерения σ_1.

На рис. 6.7 приведены зависимости допустимых значений α и β от общего числа контролируемых параметров аппаратуры при условии, что для всей аппаратуры вероятности неправильного контроля не будут превышать $\alpha \leqslant 0{,}01$; $\beta \leqslant 0{,}003$. В большинстве случаев такая достоверность результатов контроля вполне приемлема.

По найденным значениям α и β для одного параметра, пользуясь графиками, приведенными в [2], можно опре-

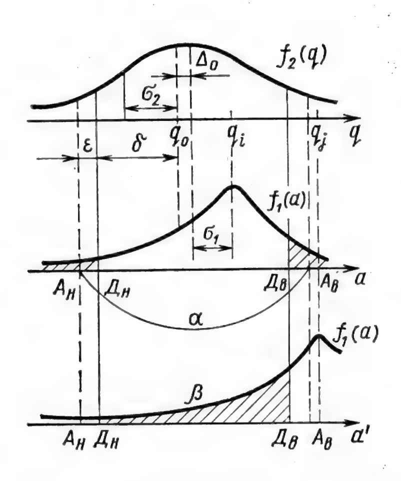


Рис. 6.5. Распределение значения контролируемого параметра q и результатов его измерения a при контроле.

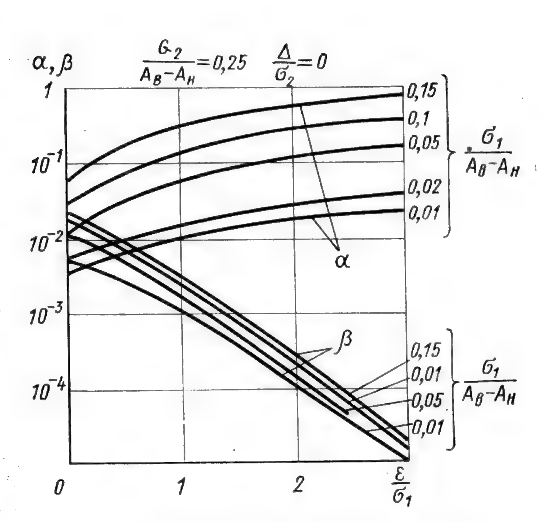


Рис. 6.6. Зависимости вероятностей ложного α и необнаруженного β отказов от отношения ε/σ_1.

делить допустимую величину среднеквадратической погрешности измерения σ_1 и оптимальное значение величины ε.

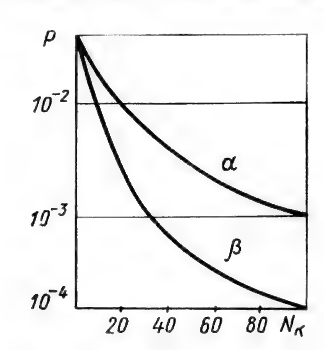


Рис. 6.7. Зависимости допустимых значений ложного α и необнаруженного β отказов от общего числа контролируемых параметров $N_к$ аппаратуры.

При этом могут быть приняты некоторые постоянные значения отношений величин $\sigma_1/(A_в - A_н)$ и ε/σ_1 для группы параметров, которые имеют одинаковые отношения величин $\sigma_2/(A_в - A_н)$ и Δ/σ_2.

6.6. ВИДЫ И СПОСОБЫ ПРОВЕРОК

Все многообразие видов контроля можно классифицировать по различным признакам [15, 20]. По виду решаемой задачи различают следующие виды контроля:

— контроль функционирования (качественная оценка работы аппаратуры);

— контроль работоспособности (количественная оценка качества работы аппаратуры);

— диагностический контроль (контроль с целью определения причины и места отказа);

— прогнозирующий контроль (предсказание состояния РТС или ее узлов в будущем);

— профилактический контроль (определение элементов, параметры которых близки к предельным допустимым значениям, с целью их замены);

— самоконтроль (определение работоспособности системы контроля РТС).

По характеру оценки результатов контроля различают:

— допусковый контроль (определение нахождения параметра в установленном поле допусков);

— количественный контроль (определение абсолютных или относительных величин параметров или их отклонений от номинальных значений).

По виду внешних воздействий:

— пассивный контроль (без внешних воздействий на контролируемый объект);

— активный контроль (оценка состояния объекта по реакциям на стимулирующие воздействия).

По способу анализа контролируемых параметров:

— выборочный контроль (проверка отдельных устройств, узлов или параметров РТС);

— последовательный контроль (последовательная оценка параметров РТС с помощью одного канала системы контроля);

— параллельный контроль (одновременный контроль нескольких параметров РТС по различным каналам системы контроля);

— комбинированный контроль (сочетание последовательного и параллельного способов контроля).

По периодичности проведения контроля:

— непрерывный контроль (информация о параметрах РТС поступает непрерывно в процессе ее работы);

— периодический контроль (анализ каждого параметра РТС выполняется через установленные интервалы времени в течение некоторого срока эксплуатации РТС);

— летучий контроль (контроль начинается в случайные моменты времени, выбираемые в установленном порядке).

По оценке динамических свойств РТС:

— статический контроль (оценка состояния РТС по установившимся значениям параметров);

— динамический контроль (оценка состояния РТС по характеристикам переходных процессов).

Кроме рассмотренных, виды контроля можно классифицировать и по другим признакам.

Все виды контроля РТС связаны с выполнением проверок различных функциональных элементов.

Проверкой называют комплекс операций, проводимых с целью определения характеристик выходных реакций одного или нескольких функциональных элементов на входное воздействие с известными характеристиками.

В зависимости от количества контролируемых при проверке функциональных элементов различают поэлементные и групповые проверки. В первом случае при проверке контролируется один функциональный элемент, во втором — несколько [5].

Способ выполнения проверки показывает, каким образом устанавливается факт неисправности контролируемого функционального элемента (группы элементов). Различают ряд способов выполнения проверок [15].

Способ *визуального осмотра* (органолептический контроль) монтажа схемы, конструкции элемента и индикаторов с целью нахождения признаков отказов. Достоинство способа — простота и малые затраты времени на выполнение проверки, недостаток — невозможность обнаружения отказавших элементов, не имеющих внешних признаков отказа.

Проверка *путем замены* состоит в замене подозреваемого в отказе элемента на заведомо исправный и определении работоспособности РТС после замены. Если после замены РТС (блок) становится работоспособной, то подозреваемый элемент действительно отказал. Достоинство способа — простота и возможность обнаружения скрытых отказов, недостаток — необходимость иметь большое количество запасных элементов.

Проверка *путем измерения* (измерительный контроль) различных параметров входных и выходных сигналов элемента. Достоинство способа — получение количественной оценки при проверке, обеспечивающей большую достоверность оценки. Недостаток — применение измерительных приборов, часто весьма сложных и дорогих, что вызывает увеличение затрат при контроле. Наиболее распространенной разновидностью способа измерений является осциллографирование, при котором предусматривается сличение опытных осциллограмм напряжений токов в характерных точках схемы с табличными. Благодаря наглядности

способ получил большое распространение при выполнении проверок РТС.

Способ *испытаний* состоит в отключении функционального элемента от схемы, подаче на его входы от специальных источников сигналов, аналогичных тем, которые имеются в реальной схеме, и наблюдении выходных сигналов элемента. Этот способ является эффективным с точки зрения определения отказа элемента. В связи с большой трудоемкостью, сложностью и необходимостью иметь специальные источники сигналов, увеличивающие стоимость выполнения проверки, способ рекомендуется применять при невозможности определения состояния элемента другими способами.

В связи с большой сложностью современных РТС (РТК) и разнородностью их элементов на практике находят применение все рассмотренные способы выполнения проверок.

Программой контроля называют любую упорядоченную последовательность проверок [2, 5, 11]. Под оптимальной программой контроля понимается такая программа, которая имеет наименьшую стоимость.

Выбор оптимальной программы контроля является достаточно сложной математической задачей.

6.7. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Контроль работоспособности РТС проводится всякий раз перед ее применением, периодически при хранении и техническом обслуживании, а также при проведении технических осмотров.

Метод контроля — это совокупность правил применения определенных принципов для осуществления контроля.

При оценке работоспособности РТС применяются метод ветвей и границ и метод предпочтения [30].

Метод ветвей и границ обеспечивает построение оптимальной программы контроля работоспособности РТС путем минимизации среднего времени контроля работоспособности.

Существо метода [30] заключается в следующем. Весь процесс построения программы разбивается на ряд шагов. На первом шаге определяются нижние границы среднего времени выполнения любой из проверок, выбранных для контроля. Из всех возможных проверок первого шага выбирается та, для которой нижняя граница среднего времени контроля является наименьшей. На втором шаге находятся нижние границы среднего времени двух проверок (проверки, выбранной на первом шаге, и любой из проверок, выбранной для контроля работоспособности, кроме проверки, выбранной на первом шаге). Из всех сочетаний проверок выбираются те, которые имеют наименьшую нижнюю границу. На третьем шаге процесс повторяется, но уже для трех проверок, из которых две определены на предыдущих двух шагах, а относительно третьей находят нижнюю границу всех возможных сочетаний проверок. Процесс продолжается до тех пор, пока на некотором шаге не будет полностью построена одна из возможных программ. Если нижняя граница, полученная на последнем шаге, будет меньше, чем нижние границы проверок всех предыдущих шагов, то она соответствует искомому решению и является оптимальной. Если нижняя граница, полученная на последнем шаге, окажется больше нижней границы хотя бы одной из программ первого шага, то процесс повторяется в том же порядке, но уже для другой возможной программы первого шага.

Метод ветвей и границ имеет тот недостаток, что при большом числе параметров, определяющих работоспособность РТС, необходимо выполнить большой объем вычислений.

Метод предпочтения [30] позволяет при небольшом объеме вычислений находить приближенное решение задачи оптимизации программы контроля работоспособности. При этом методе построение программы контроля работоспособности основано на выборе порядка проверок, чтобы каждая выполненная предыдущая проверка давала информацию о состоянии наибольшего числа элементов системы.

Для определения последовательности проверок используются некоторая функция предпочтения и правила предпочтения. Функция предпочтения ставит в соответствие каждому контролируемому параметру РТС некоторое число, которое зависит от структуры системы и от того, какие параметры уже включены в программу контроля.

Для многих практических случаев в качестве функции предпочтения удобно использовать отношение индекса предшествования к максимальному числу элементов системы.

Правило предпочтения определяет тот параметр системы, который необходимо ввести в программу после выполнения ранее предусмотренных проверок.

Для построения программы контроля работоспособности необходимо выполнять проверку параметров в порядке убывания функции предпочтения.

Пример 6.2. Для системы, изображенной на рис. 6.3, функции предпочтения различных параметров будут равны: $F_п(2)=0{,}38$; $F_п(4)=0{,}38$; $F_п(6)=0{,}5$.

Таким образом, в качестве первой проверки необходимо выбрать проверку *6*. Этой проверкой контролируются *1, 5, 6* и *7* элементы системы. Исключив эти элементы из структуры системы, рассчитаем новые значения функций предпочтения в том случае, когда в оставшейся части системы подмножества элементов пересекаются. В нашем примере оставшиеся подмножества элементов не пересекаются. Поэтому дальнейший расчет функций предпочтения не проводим. Последовательность контроля элементов *2, 4* или *8* может быть произвольной, так как у них индексы предшествования одинаковы.

Рассмотренный выше способ расчета функции предпочтения предполагает, что отказы различных элементов системы равновероятны, а времена проверок любого выхода одинаковы.

В случае различных вероятностей отказов элементов и разного времени выполнения проверок в качестве функции предпочтения удобно использовать отношение суммарной вероятности отказов элементов, контролируемых при проверке, ко времени выполнения проверки.

Метод предпочтения в силу своей простоты может найти широкое применение на практике. Однако построенная по этому методу программа контроля работоспособности может сильно отличаться от оптимальной.

6.8. МЕТОДЫ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

В случае отказа РТС необходимо принять меры к восстановлению ее работоспособного состояния, что невозможно без знания причины и места отказа. Для этого нужно проводить поиск места и причины — диагностический контроль [5, 11].

Как правило, отказы о современных РТС ищутся с точностью до отдельного блока, который заменяется на исправный блок, после чего продолжается поиск неисправности в отказавшем блоке и его ремонт.

Такая процедура поиска отказов вызвана необходимостью повышения готовности РТС к применению. В случае невысоких требований к готовности РТС поиск неисправностей и отказов может проводиться с точностью до более мелких конструктивных элементов платы, отдельного элемента.

Современные РТС имеют, как правило, высокую надежность. Поэтому появление в них (при современных методах и своевременном контроле работоспособности) одновременно большого числа отказов является событием маловероятным. Наиболее вероятно появление одного отказа.

В настоящее время разработан и применяется ряд методов [2, 11] поиска отказов и неисправностей. Все методы диагностического контроля основаны либо на анализе физических процессов, протекающих в аппаратуре, либо на анализе статистических данных об отказах.

В практике эксплуатации РТС наиболее распространены методы первой группы, описание которых приводится ниже.

1. Метод предсказания по характерным признакам заключается в том, что отказавший функциональный элемент определяется сравнением признаков возникшей неисправности с признаками характерных неисправностей, приведенных в специальных таблицах эксплуатационной документации.

Достоинство — отсутствие специальной контрольно-измерительной аппаратуры.

Недостатки этого метода:

— таблицы не обеспечивают однозначной связи между признаками отказа и реально существующим отказом, часто различные отказы имеют одни и те же или сходные внешние признаки;

— процесс поиска отказов не оптимизируется по времени;

— составление таблиц неисправностей для сложных РТС представляет трудную задачу.

2. Метод последовательной поэлементной проверки [5] заключается в последовательной проверке элементов; при обнаружении отказавшего элемента неисправность устраняется и продолжается проверка последующих элементов в цепи. Так поступают до тех пор, пока не будут найдены и восстановлены все неисправные элементы.

Максимальное количество проверок, необходимых для обнаружения отказов всех N функциональных элементов, равно N. Таким образом, максимальное количество проверок растет пропорционально числу элементов.

Среднее число проверок определяется зависимостью

$$N_{\text{ср}} = (N^2 + N - 2)/2N \tag{6.25}$$

при $N \longrightarrow \infty$, $N_{\text{ср}} \longrightarrow (N+1)/2$.

При условии равенства временных затрат на каждую проверку и условных вероятностей отказов различных функциональных элементов среднее время поиска равно

$$T_{\text{ср}} = t_{\text{п}}(N^2 + N - 2)/2N, \tag{6.26}$$

где $t_{\text{п}}$ — время выполнения проверки одного функционального элемента.

При большом числе элементов

$$T_{\text{ср}} = t_{\text{п}}(N+1)/2. \tag{6.27}$$

Достоинство — простота поиска отказа.

Недостатки:

— при поиске метод не учитывает вероятности отказов функциональных элементов;

— процесс поиска не оптимизируется по времени.

3. Метод «время — вероятность» [2] является разновидностью метода поэлементной проверки. Он заключается в проверке элементов в порядке возрастания отношения времени проверки элемента $t_п$ к условной вероятности его отказа $P_о$.

Выбранная таким образом последовательность проверок позволяет обнаружить любой отказавший функциональный элемент схемы. Максимальное число проверок, необходимых для обнаружения любого отказавшего элемента, $N_{макс}=N$. Оно не зависит от порядка выполнения проверок, а определяется числом функциональных элементов РТС.

Среднее время обнаружения неисправного функционального элемента

$$T_{ср}=\sum_{i=1}^{N} P_{оi}\, t_{пi}. \qquad (6.28)$$

При этом методе необходимо проводить отдельную проверку каждого функционального элемента. Такие проверки в практике эксплуатации РТС возможны, если элементы не связаны или слабо связаны между собой (параллельное соединение элементов, различные измерительные цепи передающей части телеметрической системы и т. п.).

Достоинство — процесс поиска отказов оптимизируется по среднему времени.

Недостаток — ограниченная область применения для сложных РТС.

4. Метод половинного разбиения (средней точки) [2] является разновидностью групповых методов поиска неисправностей.

Сущность метода заключается в том, что при первой проверке схема РТС делится на две равные части, содержащие одинаковое или отличающееся на единицу количество элементов. После первой проверки выполняется вторая, которая делит неисправную часть на две равные. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет обнаружен неисправный функциональный элемент.

Таким образом, каждая проверка определяет группу элементов, в которой находится неисправный элемент. При наличии более одной неисправности порядок поиска отказавшего элемента не изменяется. При обнаружении неисправности она устраняется, проводится проверка работоспособности системы и в случае обнаружения признаков неработоспособного состояния процесс поиска неисправного элемента повторяется. Поиск и устранение неисправностей функциональных элементов продолжается до тех пор, пока при очередной проверке работоспособности РТС она не будет удовлетворять заданным требованиям.

Максимальное число проверок этого метода $N_{макс}=\log_2 N$.

При равных вероятностях отказов элементов и одинаковом времени проверок групп метод дает оптимальное решение. В остальных случаях метод минимизирует максимальное число проверок, необходимое для обнаружения неисправного функционального элемента.

Достоинство — простота поиска отказавшего элемента.

Недостатки:

— процесс поиска отказов не оптимизируется по времени;

— не учитываются вероятности отказов элементов;

— не оптимизируются материальные затраты, так как проверки в средних точках схемы могут оказаться самыми трудоемкими;

— применение метода ограничено теми РТС, которые имеют явно выраженное последовательное соединение функциональных элементов.

5. Метод оценки эффективности проверок [2, 5] является разновидностью групповых методов поиска неисправных элементов. Он заключается в том, что последовательность проверок назначается в порядке убывания их эффективности.

Под *эффективностью проверки* понимается количество информации, получаемой при проверке, рассчитанной на единицу стоимости проверки:

$$W_к = I_к / C_к. \qquad (6.29)$$

Если в качестве стоимости принимается время проверки, то в качестве эффективности проверки принимается информативность проверки, численно равная скорости получения информации при каждой проверке. Последовательность проверок назначается в порядке убывания их эффективностей.

Для сложных РТС расчет эффективностей проверок при большом числе элементов является сложной задачей. Поэтому этот метод может быть использован организациями, проектирующими РТС и имеющими в своем распоряжении ЭВМ.

6. Метод диаграмм [2] заключается в составлении диаграмм поиска отказов на основании логического анализа электрической схемы РТС.

При составлении диаграммы поиска отказов могут встретиться два случая: в РТС имеется или только один отказ, или несколько отказов.

В первом случае составляется диаграмма испытаний, во втором — диаграмма отказов.

Рис. 6.8. Схема последовательности испытаний аппаратуры.

При составлении диаграммы испытаний применяем следующие условные обозначения. Состояние элементов в системе обозначается кружком с записью в нем числа, обозначающего состояние аппаратуры. Запись числа 0 означает, что элемент исправен, а 1 — неисправен.

Вектор испытаний обозначается линией, соединяющей кружки. У линии записывается обозначение вектора в виде двоичного числа, в котором 0 означает, что аппаратура выдержит испытание, если элемент исправен, а 1 — элемент неисправен. Новое состояние системы определяется умножением числа, обозначающего состояние, на вектор испытаний, если аппаратура выдержала испытание, или на вектор, про-

тивоположный вектору испытания, если аппаратура не выдержала испытание.

На рис. 6.8,*а* приведена система, функциональная схема которой включает в себя три блока. Здесь же изображена диаграмма испытаний (рис. 6.8,*б*).

Когда в системе имеется только один отказ, необходимо провести два испытания (верхний путь на диаграмме). В противном случае нужно провести три испытания, одно из которых предназначено для обнаружения факта отказа.

Если в системе имеется более одного отказа, составляется диаграмма отказов. При составлении диаграммы отказов учитывается, сколько

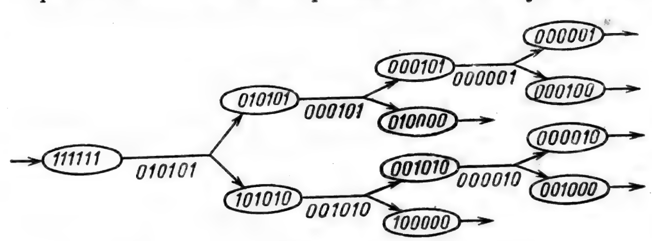


Рис. 6.9. Диаграмма отказов аппаратуры.

вариантов отказов может быть в контролируемой системе, т. е. сколько диаграмм испытаний может быть построено для рассматриваемой аппаратуры. Например, для системы, приведенной на рис. 6.8, при наличии двух отказов будем иметь шесть вариантов отказов 100, 010, 001, 110, 101, 011. Пронумеруем все варианты отказов от 1 до 6. В диаграмме отказов в узле напишем число, в котором 1 означает наличие данного вида отказа, а 0 — его отсутствие. Линией обозначим вектор испытаний, 0 — возможность, 1 — невозможность выполнения программы испытаний.

Вектор испытаний будет содержать столько цифр, сколько имеется видов отказов. В рассматриваемом случае будем иметь шесть цифр. Диаграмма отказов для рассматриваемого примера приведена на рис. 6.9.

Задача испытаний заключается в определении диаграммы отказов, соответствующей реальному состоянию контролируемого объекта. В нашем случае для выявления всех возможных диаграмм испытаний необходимо провести 5 видов испытаний, из которых в процессе контроля будет применено не более 3 видов испытаний.

Расчет и построение диаграммы отказов могут быть облегчены при использовании методов булевой алгебры [2, 5]. Однако такой расчет для сложной РТС является трудоемкой задачей, которую можно решить только применяя электронно-вычислительную технику.

Для оптимизации процесса поиска отказов этим методом необходимо определить очередность испытаний. Анализ показывает, что поиск неисправности будет близким к оптимальному, если испытания проводить в порядке убывания отношения количества информации, получаемой при контроле, к величине затрат на ее получение. Если в качестве затрат берется время испытания, то оптимизация поиска неисправности заключается в назначении такого порядка испытаний, при котором убывает информативность проверок $И_к$:

$$И_к = I_к / T_к, \qquad (6.30)$$

где $I_к$ — количество информации; $T_к$ — время испытания. Количество информации при контроле для диаграммы испытаний определяется из выражения

$$I_к = -P_{oi} \log P_{oi} - (1 - P_{oi}) \times \times \log (1 - P_{oi}), \qquad (6.31)$$

где P_{oi} — вероятность отказа нового состояния системы.

7. Метод, основанный на анализе математической модели РТС [3, 6, 21]. Динамика поведения любой РТС описывается дифференциальными уравнениями различного вида, из которых могут быть получены уравнения статического режима работы.

Величины коэффициентов в уравнениях элементов зависят от конкретных физических параметров. Исходя из анализа влияния коэффициентов на решение уравнений, можно определить оптимальную последовательность выполнения операций поиска отказавшего элемента. При этом построение плана поиска отказа может базироваться на анализе передаточных функций элементов.

Основным преимуществом этого метода является то, что последовательность поиска неисправности определяется влиянием контролируемых элементов на динамические свойства системы, которые в ряде случаев являются определяющими.

Метод анализа дифференциальных уравнений можно использовать для достаточно простых РТС. Стратегию поиска отказа сложных систем можно основать на логическом анализе их работы, при котором учитываются режимы работы, аварийное использование и структура системы.

Рассмотренный метод не учитывает эффективности испытаний, а поэтому с точки зрения затрат на контроль он будет неоптимальным.

8. Метод учета необнаруживаемых отказов [5]. При наличии в системе необнаруживаемых независимых отказов их поиск может продолжаться неограниченно долго, так как в любой момент существует вероятность необнаружения отказа. Математический анализ данного метода показывает, что существует оптимальная последовательность поиска отказа с точки зрения минимальной стоимости.

Минимальная стоимость поиска места отказа получается при условии выполнения его в порядке убывания величины

$$P_{aoi}\,\beta_i^{m-1}(1-\beta_i)/C_i(1-P_{aoi}), \qquad (6.32)$$

где P_{aoi} — априорная вероятность отказа проверяемой части системы; β_i — вероятность необнаруживаемого отказа i-й части системы; C_i — стоимость проверки i-й части системы; m — номер очередной проверки i-й части системы.

9. Метод учета необнаруживаемых и ложных отказов [5]. При наличии в РТС необнаруживаемых и ложных независимых отказов и наличии только одного отказа оптимальной будет такая последовательность поиска места отказа, при которой проверки элементов в контролируемом объекте выполняются в порядке убывания отношения

$$P_{aoi}(1-\beta_i)/(C_i+\alpha_i C_{рем}), \qquad (6.33)$$

где α_i — вероятность ложного отказа при контроле i-го элемента системы; $C_{рем}$ — стоимость ремонта или замены i-го элемента.

10. Метод «стоимость — вероятность» [2]. При рассмотрении четвертого и пятого способов предполагалось, что при контроле получается информация только о контролируемых элементах. О состоянии непроверяемых элементов при этом можно судить только по методу исключения. Следовательно, рассматривалась модель системы с функционально не связанными между собой элементами. На практике наличие в РТС функциональных и иных связей между элементами приводит

к такому положению, при котором проверка некоторого элемента несет в себе информацию о состоянии ряда неконтролируемых элементов.

Формально эта информация выражается в перераспределении вероятностей отказов непроверенных элементов в зависимости от исхода предшествующей проверки. Учет зависимости между отказами приводит к такой последовательности проверок элементов, при которой не убывает величина

$$C_{ki}(1-P_{\text{ao}i})/P_{\text{ao}ki}, \tag{6.34}$$

где C_{ki} — стоимость k-го элемента в i-м блоке; $P_{\text{ao}ki}$ — вероятность его отказа; $P_{\text{ao}i}$ — априорная вероятность отказа i-го блока. При этом предполагается, что РТС состоит из нескольких блоков, а каждый блок из нескольких элементов, подвергаемых проверке.

В случае одноблочного построения РТС получаем последовательность проверки в порядке возрастания величины $C_{\text{к}}/P_{\text{ок}}$. Если в качестве затрат на контроль принимается время контроля $t_{\text{к}}$, то получаем известный метод «время — вероятность».

Если вероятность отказов, стоимости проверок и время проверок различных элементов одинаковы или близки друг к другу, то нет необходимости вести расчет отношения $t_{\text{к}}/P_{\text{ок}}$. Оптимальным будет такой порядок проверок, когда схема РТС делится на две части, у которых вероятности отказов одинаковы. Как известно из теории информации, такая проверка будет нести наибольшее количество информации о месте отказа в системе. Место последующей проверки определяется также делением оставшихся элементов на две части с равными или близкими друг к другу вероятностями отказов.

6.9. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Прогнозирование состояния РТС осуществляется по обобщенным параметрам, значения которых достаточно полно характеризуют работоспособность всей системы. К таким параметрам можно отнести коэффициенты передачи, коэффициенты усиления, характеристики обратных связей и т. п.

Задача прогнозирования состояния РТС может быть сформулирована в следующем виде. Пусть контролируемый параметр РТС представляет собой функцию $q(t)$, которая в известной области T_1 принимает в моменты времени $t_0, t_1, \ldots, t_n$ значения $q(t_0), q(t_1), \ldots, q(t_n)$ (рис. 6.10). Необходимо по известным значениям $q(t_0), q(t_1), \ldots, q(t_n)$ функции $q(t)$ предсказать ее значения для последующих моментов времени $t_{n+1}, t_{n+2}, \ldots, t_{n+m}$ в будущем (в области T_2).

Таким образом, задачу прогнозирования можно решить при условии, что известно значение контролируемого параметра не менее чем в двух точках. Следовательно, условия задачи прогнозирования вызывают необходимость накопления статистических данных о результатах измерений определяющих параметров при контроле РТС.

Различают математические и аппаратурные методы прогнозирования. Математические методы прогнозирования основаны на применении различных теорий: численного анализа, случайных функций, вероятностей, распознавания образов и игр. Наиболее распространенными являются методы, основанные на первых трех теориях.

Прогнозирование с помощью аппарата численного анализа может быть выполнено только для монотонно возрастающих или монотонно убывающих во времени параметров [3]. При решении задачи вместо контролируемой функции параметра $q(t)$ выбирают достаточно простую для вычисления интерполирующую функцию $B_{\text{и}}(t)$ таким образом, чтобы ее значения были равны значениям функции $q(t)$ в одинаковые моменты времени. Чаще всего функцию $B_{\text{и}}(t)$ отыскивают в виде ал-

гебраического многочлена, получая при этом на небольших отрезках времени достаточно хорошее приближение.

В этом случае задача экстраполирования может быть сформулирована следующим образом. По данным значениям $t=t_0(t_1, t_2, \ldots, t_n)$ и $q(t)=q(t_0)[q(t_1), q(t_2), \ldots, q(t_n)]$ необходимо найти многочлен $B_и(t)=q(t)$ степени n, удовлетворяющий условиям

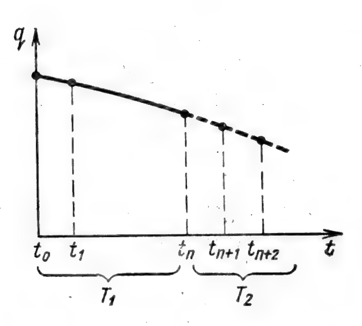


Рис. 6.10. Области известных T_1 и неизвестных T_2 значений контролируемого параметра.

$$B_и(t_0)=q(t_0);\ B_и(t_1)=q(t_1);\ \ldots;$$

$$B_и(t_n)-q(t_n)\leqslant \varepsilon_1; \qquad (6.35)$$

$$B_и(t_{n+1})-q(t_{n+1})\leqslant \varepsilon_2;\ \ldots;$$

$$B_и(t_{n+m})-q(t_{n+m})\leqslant \varepsilon_n,$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \ldots, \varepsilon_n$ — заданные величины, а $q(t_{n+1}), \ldots, q(t_{n+m})$ — неизвестные значения функции $q(t)$ в области T_2.

Многочлен $B_и(t)$ обычно имеет вид

$$B_и(t)=a_0+a_1t+a_2t^2+\ldots$$

$$\ldots+a_nt^n, \qquad (6.36)$$

где неизвестные значения a_i находятся решением системы из $n+1$ уравнений с $n+1$ неизвестным. В зависимости от вида многочлена на практике при решении могут быть использованы различные формулы: Лагранжа, Ньютона, наименьших квадратов, рядов и др.

Математический аппарат теории случайных функций может быть использован для прогнозирования состояния РТС по параметрам, представляющим собой случайные функции, описываемые с помощью статистических характеристик.

Все методы, основанные на теории случайных функций, предполагают, что случайные функции параметров РТС в рассматриваемом интервале являются квазистационарными.

При таком предположении задача прогнозирования может быть решена на основании теорий линейной экстраполяции случайных функций, нелинейной экстраполяции случайных функций и простейших операторов [3].

При решении задачи линейной экстраполяции прогнозирования состояния РТС для получения экстраполяционных многочленов может быть использован корреляционный или спектральный анализ функций [3]. В случае применения корреляционного анализа коэффициенты экстраполяционной функции находятся по значениям корреляционной функции из системы линейных уравнений, составленной на основании условия минимума среднеквадратической погрешности ошибки экстраполяции. Для гауссова распределения такое представление функции является наилучшим. Однако следует иметь в виду, что ошибка прогнозирования в этом случае зависит от погрешности определения корреляционной функции, точность которой определяется количеством известных значений прогнозируемой функции.

В случае линейной экстраполяции на основе спектрального анализа используется спектральное разложение корреляционной функции.

Применение теории нелинейной экстраполяции для прогнозирования состояния РТС вызывает большие трудности из-за недостаточного развития этой области в теории случайных функций.

Решение задачи прогнозирования состояния РТС на основе теории простейших операторов основано на том, что все преобразования контролируемой функции с целью получения ее значений в будущем есть не что иное, как реализация некоторого оператора системы прогнозирования. В большинстве случаев математические описания таких операторов имеют сложный вид. Для прогнозирования наиболее целесообразно использование простейших линейных операторов.

На практике могут возникнуть затруднения при выборе наилучшего метода прогнозирования. Конкретные рекомендации по применению того или иного метода дать затруднительно, так как они зависят от многих факторов: постановки задачи прогнозирования, количества и качества информации о состоянии системы, вида контролируемой функции.

В данном параграфе мы рассмотрим методы прогнозирования состояния РТС на основе теории вероятности [3].

Сущность этого метода заключается в отыскании вероятности исправного состояния РТС для любого наперед заданного момента времени.

Для нормального распределения определяющего параметра выражение для этой вероятности можно записать в виде

$$P(t) = P[A_{\text{и}} \leqslant q(t) \leqslant A_{\text{в}}] =$$

$$= \left[\Phi\left(\frac{A_{\text{в}} - q_{\text{ср}}(t)}{\sigma(t)\sqrt{2}}\right) - \right.$$

$$\left. - \Phi\left(\frac{A_{\text{и}} - q_{\text{ср}}(t)}{\sigma(t)\sqrt{2}}\right)\right], \qquad (6.37)$$

где $q_{\text{ср}}(t) = \sum_{i=1}^{n} q_i(t)/n$ — среднее значение параметра в момент времени t; $\sigma(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} [q_i(t) - q_2(t)]^2/(n-1)}$ — среднеквадратическое отклонение параметра от математического ожидания; $A_{\text{н}}$, $A_{\text{в}}$ — предельные значения определяющего параметра; $\Phi(y)$ — табулированная функция Лапласа; n — количество измерений.

Таким образом, на основании имеющихся статистических данных о реализациях параметра определим значение $q_{\text{ср}}(t)$ и $\sigma(t)$ для любого момента времени и находим значение вероятности $P(t)$.

Решение задачи прогнозирования будет наиболее простым, когда реализация параметра аппроксимируется прямой линией, т. е. параметр изменяется в одну сторону и на него установлен односторонний допуск. В этом случае

$$P(t) = 0{,}5\left[1 + \Phi\left(\frac{q_{\text{ср}}(t) - A_{\text{н}}}{\sigma(t)\sqrt{2}}\right)\right]. \qquad (6.38)$$

Далее, исходя из заданного уровня надежности $P_{\text{доп}}$, определим время $t_{\text{прогн}}$, при достижении которого производится профилактическая замена узлов, влияющих на контролируемый параметр. Время $t_{\text{прогн}}$ определяется при подстановке $P(t) = P_{\text{доп}}$.

Аппаратурные методы прогнозирования отказов могут быть двух видов [20]:

— прогнозирование при нормальном режиме работы РТС;

— прогнозирование при специальных режимах работы аппаратуры.

В первом случае предполагается, что параметры РТС изменяются линейно. При этом легко определяется отрезок времени, через который необходимо произвести профилактические работы по результатам двух предыдущих измерений.

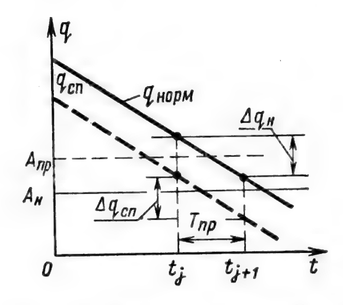


Рис. 6.11. Изменение контролируемого параметра при нормальном $q_{\text{норм}}$ и специальном $q_{\text{сп}}$ режимах работы.

Во втором случае РТС должна работать в специальном режиме, который создается изменением режимов питания аппаратуры или другими способами. Специальный режим работы приводит к изменению определяющего параметра, по которому можно определить время безотказной работы РТС.

Пусть параметры нормального $q_{\text{норм}}(t)$ и специального режимов работы $q_{\text{сп}}(t)$ изменяются во времени по линейному закону (рис. 6.11), причем изменение параметра при нормальном режиме работы $\Delta q_{\text{н}} = q_{j\,\text{норм}} - q_{(j+1)\text{норм}}$ точно соответствует изменению параметра при специальном режиме $\Delta q_{\text{сп}} = q_{j\,\text{сп}} - q_{(j+1)\text{сп}}$ за один и тот же отрезок времени. Если в момент времени t_j величина параметра $q_{\text{сп}}(t_j) > A_{\text{н}}$, то параметр $q(t)$ в течение времени $T_{\text{пр}}$ с большой вероятностью не выйдет за пределы допуска.

При изменении параметра по закону, отличающемуся от линейного, проводится его аппроксимация чаще всего линейной зависимостью. Длительность участка прогнозирования при этом зависит от вида закона изменения параметра.

Прогнозирование в специальном режиме работы аппаратуры сложнее прогнозирования отказов при нормальном режиме. Его применение оправдано в связи с уменьшением времени на прогнозирование.

6.10. АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ

С усложнением РТС увеличивается количество контролируемых параметров, следовательно, увеличивается стоимость и время контроля. Стоимость контроля $C_к$ почти линейно зависит от количества контролируемых параметров. Время контроля имеет более сложную зависимость (рис. 6.12).

Методы диагностического и прогнозирующего контроля требуют высокой квалификации обслуживающего персонала и не гарантируют его от ошибок. Поэтому появилась необходимость использования автоматических устройств контроля, которые позволяют получить выигрыш

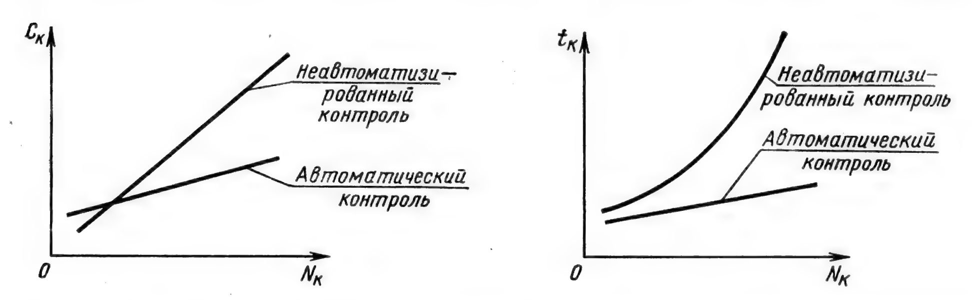


Рис. 6.12. Зависимость стоимости $C_к$ и времени контроля $t_к$ от степени автоматизации проверок.

во времени, уменьшить расход ресурса аппаратуры, увеличить безотказность, снизить долю субъективных ошибок обслуживающего персонала.

По принципу действия все автоматы контроля могут быть разделены на две группы: автоматы индикации неисправности и поиска неисправности [7, 13, 21].

Выбор типа и принципов построения автоматов индикации неисправностей зависит от типа контролируемой РТС и требований, предъявляемых к аппаратуре контроля. При разработке этих автоматов прежде всего необходимо выбрать параметры для индикации. При этом исходят из следующих соображений.

Введение автомата не должно приводить к чрезмерному усложнению контролируемой аппаратуры и аппаратуры контроля. Поэтому количество индицируемых параметров должно быть минимальным. Конструкция измерительных преобразователей не должна влиять на работу контролируемой аппаратуры.

Все параметры РТС можно разделить на активные и пассивные. К первым относятся токи, напряжения, частоты и мощности сигналов и т. п., а ко вторым — сопротивления, индуктивности, емкости элементов.

Схемы автоматов индикации состояния активных и пассивных параметров приведены на рис. 6.13 и 6.14. Различием схем автоматов является наличие генератора стимулирующих воздействий в автомате индикации состояния пассивных параметров, который вырабатывает стандартные эталонные сигналы. В большинстве случаев на практике автоматы индикации неисправностей строятся по комбинированной схеме, так как необходимо контролировать состояние как активных, так и пассивных элементов РТС.

Автоматы поиска неисправностей по принципу действия можно разделить на непрерывные и дискретные. В автоматах первого типа контроль состояния элементов при поиске неисправности проводится непрерывно. Информация о состоянии контролируемого элемента представ-

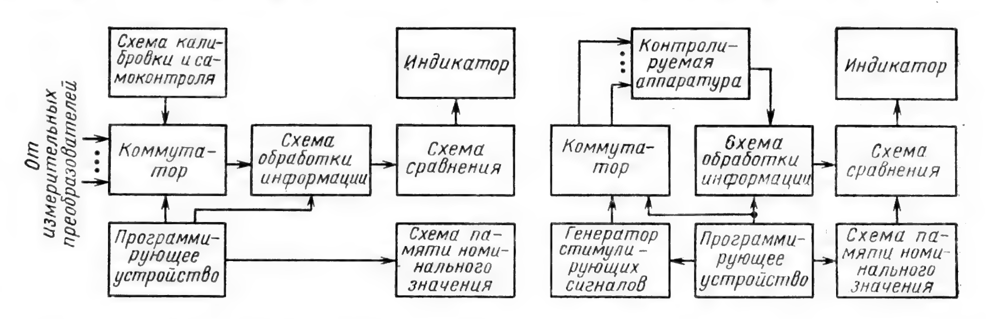


Рис. 6.13. Схема автомата индикации активных элементов.

Рис. 6.14. Схема автомата индикации пассивных элементов.

ляется в аналоговой или цифровой форме. В автоматах второго типа контроль состояния элементов при поиске осуществляется дискретно во времени. Информация о состоянии контролируемых элементов получается только в момент запроса или вслед за ним.

Для примера рассмотрим автомат непрерывного поиска неисправности. Все логические операции поиска могут быть представлены совокупностью элементарных логических схем (ЭЛС). Принцип

Рис. 6.15. Элементарная логическая схема автомата индикации отказа.

действия ЭЛС, осуществляющей контроль состояния функционального элемента, заключается в следующем. ЭЛС можно представить в виде четырехполюсника (рис. 6.15). Наличие сигнала на одном из его выходов x_3 соответствует поступлению сигналов на входы x_1 и x_2, а сигнала x_4 — наличию сигнала на входе x_1 и отсутствию его на входе x_2.

Если предположить, что при исправном состоянии функционального элемента на вход x_2 сигнал поступает, а при неисправном — не поступает, то ЭЛС можно реализовать с помощью схемы, состоящей из двух схем И и одной схемы НЕ (рис. 6.16). Используя такие логические схемы, можно построить автомат поиска неисправности.

Рассмотрим простую схему РТС, состоящую из трех функциональных элементов, каждому из которых соот-

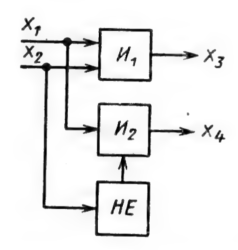


Рис. 6.16. Структурная схема элементарной логической схемы автомата индикации отказа.

ветствует своя логическая схема (рис. 6.17). На рис. 6.17 обозначены: x_4, x_7, x_{10} — сигналы о неисправности соответственно первого, второго и

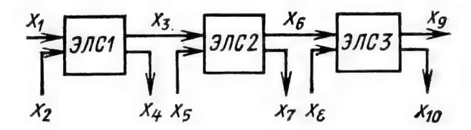


Рис. 6.17. Структурная схема автомата индикации состояния РТС, состоящая из трех устройств.

третьего функциональных элементов схемы; x_3, x_6, x_9 — сигналы об исправном состоянии соответственно первого, первого и второго; первого, второго и третьего функциональных узлов; x_1 — сигнал опроса состояния всех элементов; x_2, x_5, x_8 — сигналы опроса состояния ЭЛС1, ЭЛС2 и ЭЛС3.

Используя элементарные логические схемы, можно построить автомат непрерывного контроля состояния любого числа элементов.

6.11. ПРИНЦИП ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ, ПОДЛЕЖАЩИХ КОНТРОЛЮ

Система должна удовлетворять определенным тактическим требованиям в зависимости от ее назначения. Например, к числу важнейших тактических показателей измерительных РТС относятся: дальность, точность измерения координат объектов, точность измерения скорости их движения и т. д. Тактические показатели РТС определяются их техническими параметрами. Наиболее объективно и полно состояние РТС оценивается по соответствию ее параметров требованиям технических условий.

Для принятия решений о техническом состоянии системы должны быть установлены требования на пределы допустимых отклонений ее параметров. Эти требования зависят от допустимых границ изменения тактических показателей. При больших допустимых границах изменения тактических параметров в должной степени не используются возможности аппаратуры, а при малых — необходимо чаще проводить мероприятия, направленные на поддержание этих параметров в пределах допустимых норм, что приводит к дополнительным затратам сил и средств.

В процессе эксплуатации аппаратуры решаются две задачи:

1. По известным отклонениям технических параметров от номинальных значений необходимо определить возможные границы изменения тактических параметров.

2. Зная допустимые границы изменения тактических параметров, необходимо определить допустимые отклонения технических параметров, обусловливающих эти границы.

Предположим, что тактический параметр системы y является функцией нескольких независимых переменных технических параметров $y=\varphi(x_1, x_2, \ldots, x_n)$. В этом случае решение первой задачи заключается в определении ошибки функции при известных ошибках аргумента.

Предельная относительная ошибка функции нескольких независимых переменных $(\delta y)_{\text{пр}}$ при удовлетворении ее условию непрерывности равна

$$(\delta y)_{\text{пр}} = \pm a[\ln(x_1, x_2, \ldots, x_n)]. \qquad (6.39)$$

Выражение (6.39) можно записать в ином виде

$$(\delta y)_{\text{пр}} = \pm(a_1\delta x_1 + a_2\delta x_2 + \ldots + a_n\delta x_n) = a_1\frac{dx_1}{x_1} + a_2\frac{dx_2}{x_2} + \ldots + a_n\frac{dx_n}{x_n}, \qquad (6.40)$$

где δx_1, $\delta x_2, \ldots, \delta x_n$ — относительные ошибки аргументов; a_1, $a_2, \ldots, a_n$ — коэффициенты, показывающие степень влияния ошибок аргумента на ошибку функции.

Выражение (6.40) позволяет определить предельную ошибку функции, если известны ошибки аргументов.

Вторая задача является обратной первой, а для ее решения может быть использована также формула (6.40). Однако, как видно из (6.40),

задача нахождения ошибок аргументов по известной ошибке функции является неопределенной. Для исключения неопределенности используется принцип равных влияний, т. е. полагают, что

$$a_1\delta x_1 = a_2\delta x_2, \ldots, \; a_n\delta x_n = (\delta y)_{пр}/n. \qquad (6.41)$$

Если известна предельно допустимая ошибка функции, то из (6.41) определяются ошибки аргументов

$$\delta x_1 = \pm(\delta y)_{пр}/na_1, \quad \delta x_2 = \pm(\delta y)_{пр}/na_2, \quad \delta x_n = \pm(\delta y)_{пр}/na_n.$$

Пример 6.3. Относительная ошибка измерения скорости движения объекта беззапросной системой за счет нестабильности частоты бортового и наземного генераторов определяется [31] так:

$$\Delta\dot{l}/C = \sqrt{\alpha^2_б + \alpha^2_н}. \qquad (6.42)$$

Определить ошибку в измерении скорости, если относительная нестабильность частоты бортового и наземного генераторов составляет соответственно $\alpha_б = 9\cdot 10^{-10}$; $\alpha_н = 4{,}5\cdot 10^{-10}$.

Решение. Используя (6.42), находим

$$\Delta\dot{l} = 3\cdot 10^8 \times$$
$$\times\sqrt{(9\cdot 10^{-10})^2 + (4{,}5\cdot 10^{-10})^2} = 0{,}3 \text{ м/с}.$$

Пример 6.4. Формула дальности при распространении радиоволн в свободном пространстве имеет вид [30]

$$l_{макс} = K_1\sqrt[4]{P_{ср}\eta^2G^2\lambda^2/P_{пр}F_и\tau_и}, \qquad (6.43)$$

где K_1 — коэффициент пропорциональности; $P_{ср}$ — средняя мощность высокочастотных колебаний передатчика; η — к. п. д. антенно-волноводного тракта; G — коэффициент направленного действия антенны; λ — длина волны; $P_{пр}$ — реальная чувствительность приемного устройства; $F_и$ — частота следования импульсов; $\tau_и$ — длительность импульса.

Определить пределы отклонения технических параметров системы, если предельно допустимые отклонения дальности действия от номинального значения в процессе эксплуатации $(\delta l)_{пр}$ не должны превышать 10%.

Решение. Поскольку дальность действия есть функция нескольких переменных, то предельную относительную ошибку согласно (6.39) получим из (6.43)

$$(\delta l)_{пр} = dl_{макс} =$$
$$= d[1/4(\ln P_{ср}\eta^2G^2\lambda^2 -$$
$$- \ln P_{пр}F_и\tau_и)]. \qquad (6.44)$$

Отклонением λ, $F_и$, $\tau_и$ от номинального значения можно пренебречь. Тогда выражение (6.44) запишем

$$\delta l_{пр} = dP_{ср}/4P_{ср} +$$
$$+ dP_{пр}/4P_{пр} + d\eta/2\eta +$$
$$+ dG/2G. \qquad (6.45)$$

Используя принцип равных влияний, из (6.45) определим значение допустимых отклонений технических параметров от установленных норм

$$dP_{ср}/P_{ср} = \pm(\delta l)_{пр} = \pm 10\%,$$
$$d\eta/\eta = \pm 0{,}5(\delta l)_{пр} = \pm 5\%,$$
$$dP_{пр}/P_{пр} = \pm(\delta l)_{пр} = \pm 10\%, \qquad (6.46)$$
$$dG/G = \pm 0{,}5(\delta l)_{пр} = \pm 5\%.$$

Поскольку в действительных условиях маловероятно одновременное ухудшение всех параметров, то относительные ошибки составляющих могут быть взяты в два раза больше тех, которые получились в выражениях (6.46).

Как видно из приведенных примеров, к числу основных параметров систем, которые необходимо контролировать при определении работоспособности в процессе эксплуатации, относятся:

— мощность радиопередатчика;
— чувствительность радиоприемника;
— коэффициент направленного действия антенны;
— затухание в антенно-волноводных трактах;
— стабильность частоты генераторов (для допплеровских систем измерения скорости).

Методика измерения и контроля параметров РТС излагается в III разделе.

Аналогично, как это сделано для скорости и дальности, могут быть составлены требования для точности поддержания и контроля любых технических параметров системы. С учетом анализа и опыта эксплуатации аналогичных систем точность поддержания номинальных значений параметров приводится в паспортных данных на соответствующую РТС.

Глава 7

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

7.1. ЗАДАЧИ И СОДЕРЖАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Техническое обслуживание — это комплекс работ для поддержания исправности или только работоспособности РТС при подготовке и использовании по назначению, при хранении и транспортировании [27].

Комплекс взаимосвязанных положений и норм, определяющих организацию и порядок проведения работ по техническому обслуживанию для заданных условий эксплуатации с целью обеспечения показателей качества, предусмотренных в нормативной документации, называют *системой технического обслуживания* [27].

В связи с неодинаковыми условиями использования, хранения и транспортирования аппаратуры системы технического обслуживания наземных стационарных или подвижных, самолетных, космических, корабельных РТС различны.

Системой технического обслуживания предусматривается проведение вспомогательных операций, контрольно-проверочных, регулировочно-настроечных, профилактических и ремонтных работ [20].

Вспомогательные операции предназначены для подготовки аппаратуры, инструмента, контрольно-измерительных приборов и рабочего места к проведению основных мероприятий. К ним относятся: включение и прогрев аппаратуры, ее развертывание, подключение и проверка контрольно-измерительных приборов, приведение аппаратуры в исходное состояние после проведения контрольных, профилактических или ремонтных мероприятий и т. п.

Контрольно-проверочные работы заключаются в измерении и контроле технических параметров аппаратуры и режимов ее работы для определения готовности РТС к применению, а также в определении необходимости ее настройки, регулировки или ремонта. При этом выявляются те неисправности, которые не могут быть обнаружены в процессе работы аппаратуры. Обычно это частичные отказы или отказы по трудноконтролируемым параметрам.

Контроль состояния РТС может быть качественным или инструментальным. Качественный контроль осуществляется прослушиванием работы аппаратуры, наблюдением за сигналами визуального отображения, а также за движением механических частей. Инструментальный контроль проводится путем проверки выходных и промежуточных параметров аппаратуры с помощью специальной контрольно-испытательной серийной или специально серийной аппаратуры.

Одним из важнейших условий поддержания РТС в исправном состоянии является систематический контроль ее технического состояния. Для оценки качества эксплуатации РТС обслуживающим персоналом и определения технического состояния аппаратуры эксплуатирующими

организациями периодически проводятся технические осмотры и проверки [26].

Технические осмотры проводятся для проверки правильности содержания аппаратуры, оценки ее технического состояния (исправности и работоспособности), правильности ведения эксплуатационной документации, а также укомплектованности ЗИПом и расходными материалами.

В отличие от контрольной проверки технические проверки предназначены для определения технического состояния, работоспособности и готовности к применению РТС. Они включают в себя технический осмотр, проверку правильности организации эксплуатации, своевременности проведения технического обслуживания, а также определение качества подготовки обслуживающего персонала.

Регулировочные и настроечные работы состоят из операций, при которых параметры узла (блока, прибора, системы или комплекса) доводят до значений, установленных техническими требованиями. Регулировочные работы, проводимые без изменения элементов схемы и конструкции, называют настройкой аппаратуры.

Профилактические работы обеспечивают повышение безотказности работы аппаратуры в течение заданного промежутка времени за счет своевременного предупреждения отказов путем их прогнозирования, а также проведения сезонных смазочных и крепежных работ. *Ремонтные* работы проводятся для устранения выявленных и потенциальных отказов аппаратуры.

Техническое обслуживание РТС проводится циклически. Цикл *технического обслуживания* — это наименьший повторяющийся период эксплуатации, в течение которого осуществляются в определенной последовательности установленные виды технического обслуживания, предусмотренные нормативной документацией.

К техническому обслуживанию предъявляются следующие требования: поддержание готовности аппаратуры на требуемом уровне, простота организации и планирования, минимальные временные и экономические затраты.

При определении объема и периодичности мероприятий технического обслуживания исходят из противоречивых требований. С одной стороны, необходимо проведение как можно бóльшего объема работы для обеспечения заданного уровня надежности и готовности аппаратуры, что требует значительных затрат времени, сил и средств. С другой стороны, длительный простой аппаратуры во время технического обслуживания ведет к экономическим потерям и снижению эффективности ее применения. По этой причине сроки проведения мероприятий технического обслуживания должны быть обоснованы. Объем и периодичность выполнения мероприятий по техническому обслуживанию узакониваются специальными инструкциями по техническому обслуживанию [35]. Техническое обслуживание, предусмотренное в нормативной документации и осуществляемое в плановом порядке, называют *плановым*.

7.2. ОБСЛУЖИВАЮЩИЙ ПЕРСОНАЛ И ЕГО ЗАДАЧИ

Техническое обслуживание радиотехнических комплексов (систем) проводится специально подготовленным инженерно-техническим персоналом, который называют также обслуживающим (эксплуатационным) персоналом [26].

В зависимости от назначения и выполняемых функций обслуживающий персонал подразделяется на дежурный и внесменный (ремонтный, персонал метрологической службы, а также персонал материально-технического снабжения).

Дежурный персонал обеспечивает нормальное функционирование РТК (систем) в периоды подготовки и проведения сеансов связи [25]. Он непосредственно отвечает за техническое состояние средств, проводит все виды технического обслуживания и ведет записи в эксплуатационно-технической документации.

Для обеспечения технически грамотного безаварийного обслуживания РТС дежурный персонал должен изучить принципы построения и эксплуатации, эксплуатационно-техническую документацию, правила технической эксплуатации аппаратуры РТС, местные эксплуатационные инструкции, должностную инструкцию и правила внутреннего распорядка, правила техники безопасности при эксплуатации, а также устав о дисциплине работников [26].

Дежурный персонал несет ответственность за нормальную бесперебойную работу РТС в соответствии с установленным расписанием или дополнительными указаниями, полученными от руководства [25]. В своей работе дежурный персонал должен руководствоваться правилами по технической эксплуатации и инструкциями по техническому обслуживанию соответствующей аппаратуры, а также выполнять следующие основные требования:

1. В период подготовки обеспечивать нормальную работу системы (комплекса).
2. Во время работы строго соблюдать регламентированные режимы работы, осуществляя за ними постоянный контроль.
3. После окончания работы и выключения аппаратуры устранять все замеченные недостатки в ее работе, а также проверять правильность заполнения эксплуатационно-технической документации.
4. При повреждениях аппаратуры определять характер неисправности и время, необходимое для восстановления ее нормальной работы. Если переход на резервную аппаратуру осуществляется быстрее, чем ликвидация повреждения, дежурный персонал обязан включить резервную аппаратуру, после чего приступить к устранению неисправности, сообщив о ней ответственному должностному лицу.
5. При приеме и сдаче дежурства проверять в действии исправность всех систем комплекса, состояние источников питания и антенных устройств и сооружений, наличие и исправность защитных средств по технике безопасности, наличие инструмента, запасных радиоэлементов и частей по инвентарной описи и документации; сообщать новой смене о всех мероприятиях и указаниях, которые не выполнены предыдущей сменой, а также о характере работы аппаратуры; просматривать все записи в эксплуатационных документах за прошедшее дежурство.
6. Сдача и прием дежурства при неисправном оборудовании без разрешения руководителя эксплуатирующей организации не допускается. Дежурный персонал обязан принять все меры к устранению обнаруженных неисправностей.

Внесменный персонал проводит работы по обслуживанию РТС в соответствии с общим графиком работ или по согласованию с руководителем дежурного персонала. Внесменный работник делает записи в эксплуатационных документах о всех выполненных работах и обнаруженных недостатках.

Каждый вновь принятый работник, которому предстоит обслуживать установки высокого и низкого напряжения, а также антенные устройства, подвергается медицинскому освидетельствованию.

Для более быстрого усвоения должностных обязанностей вновь принятый работник прикрепляется к наиболее квалифицированному с последующей работой в качестве дублера. Он обязан изучить принципы построения и работы соответствующих РТС, а также правил их эксплуатации; ознакомиться с размещением и особенностями работы взаимодействующего оборудования; знать и выполнять мероприятия по безопасности работы.

Знание операций, выполняемых на рабочем месте, правил техники безопасности и правил технической эксплуатации проверяет специально создаваемая комиссия [24]. После успешной сдачи экзамена и проведения заключительной стажировки на рабочем месте вновь принятый работник допускается служебным распоряжением к самостоятельной работе [24]. В последующем знания работников проверяются периодически в установленное время.

7.3. ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ И ВИДЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ [8, 24—26]

Периодичность технического обслуживания назначается по трем принципам: календарному, временному и смешанному.

При *календарном принципе* мероприятия технического обслуживания проводятся по истечении определенного времени (день, неделя, месяц, квартал, год и т. д.) независимо от наработки аппаратуры. Мероприятия технического обслуживания, проводимые по календарному принципу, часто называют профилактическими работами. На практике различают ежедневное, недельное, месячное, квартальное, полугодовое, годовое и сезонное техническое обслуживание.

Объем и содержание этих работ приводится в инструкции по эксплуатации РТС (комплекса).

Временной принцип предусматривает периодичность технического обслуживания исходя из наработки аппаратуры. Этот вид обслуживания часто называют регламентными работами. Он проводится, например, через 25, 50, 100, 200, 500, 1000 ч наработки аппаратуры [24, 25]. Этот принцип применим лишь для аппаратуры непрерывного действия.

При *смешанном принципе* техническое обслуживание организуется по календарному принципу, но при этом учитывается наработка. Соответствующие регламентные работы совмещаются с профилактическими в необходимое время. Такое техническое обслуживание при эксплуатации РТС называют регламентно-профилактическими работами. Его целесообразно применять для аппаратуры многократного использования со случайным временем применения.

Целесообразность применения того или иного принципа организации технического обслуживания можно определить по статистическим характеристикам безотказности аппаратуры при работе $\Lambda_{р}$ и хранении $\Lambda_{хр}$, а также по составляющим времени работы $T_{р}$ и хранения $T_{хр}$.

Из выражения для эквивалентного времени работы $T_{рэ}$ [20]

$$T_{рэ}=T_{р}+T_{хр}\Lambda_{хр}/\Lambda_{р} \tag{7.1}$$

следует, что если первое слагаемое существенно больше второго, то временем хранения можно пренебречь. При этом необходимо применять

временной принцип организации технического обслуживания. При равенстве слагаемых применяют смешанный принцип организации технического обслуживания. В случае преобладающего влияния слагаемого, содержащего время хранения, следует назначать календарный принцип организации обслуживания (например, при хранении РТС на базах и складах).

Следует иметь в виду, что на практике не всегда возможно реализовать наиболее рациональный для данной аппаратуры принцип организации технического обслуживания. Обычно в организациях, обслуживающих сложные РТК, имеются различные образцы аппаратуры. Каждый образец имеет свои характеристики безотказности и определенные периоды работы и хранения. При таких условиях применение рационального принципа организации обслуживания для каждого образца техники связано с трудностями обеспечения заданной степени готовности всего комплекса. В таких случаях наиболее рационально выбирать принцип организации обслуживания по наиболее ответственной части комплекса. Например, в авиации обслуживание радиоаппаратуры проводится по временно́му принципу в соответствии с потребностями технического обслуживания двигателя как основного элемента самолета.

В организационном отношении самым удобным является календарный принцип организации технического обслуживания, при котором упрощаются планирование, материально-техническое снабжение, контроль за качеством и сроками выполнения работ, а также руководство техническим персоналом. Однако при эксплуатации РТК с однотипной аппаратурой возникают трудности с обеспечением контрольно-испытательной и измерительной аппаратурой, квалифицированными кадрами, ремонтными приспособлениями и т. п.

7.4. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

К основным показателям технического обслуживания относятся [8, 20, 27, 29]: продолжительность технического обслуживания $T_{\text{то}}$, трудоемкость технического обслуживания $V_{\text{то}}$, стоимость технического обслуживания $C_{\text{то}}$, вероятность выполнения технического обслуживания в заданное время $P_{\text{то}}$, коэффициент профилактичности РТС $K_{\text{пф}}$, коэффициент эффективности технического обслуживания $K_{\text{это}}$, периодичность технического обслуживания $\tau_{\text{то}}$.

Продолжительность технического обслуживания — это время проведения одного технического обслуживания РТС [27]

$$T_{\text{то}}=\sum_{i=1}^{s} t_{\text{оп}i},$$

где $t_{\text{оп}i}$ — средняя продолжительность i-й операции обслуживания; s — количество операций при выполнении одного обслуживания РТС. Этот показатель зависит от объема работ, квалификации специалистов, приспособленности РТС к обслуживанию, организации работ по обслуживанию, а также от качества материально-технического обеспечения.

Время простоя аппаратуры в ожидании следует учитывать отдельно, так как длительность ожидания не зависит от объема работ, проводимых при техническом обслуживании.

В практике используются показатели суммарной и удельной суммарной продолжительности технического обслуживания. *Суммарная про-*

должительность технического обслуживания — это время проведения технического обслуживания РТС за определенный период эксплуатации [27]:

$$T_{\text{то}\Sigma} = \sum_{i=1}^{N} T_{\text{то}\Sigma} = N_{\text{то}}(t)\, T_{\text{то}} = \frac{tT_{\text{то}}}{\tau_{\text{то}}},$$

где $N_{\text{то}}(t) = t/\tau_{\text{то}} = 1, 2, \ldots, N_{\text{то}}$ — количество технических обслуживаний РТС за время t, округленное до целого числа. Суммарная продолжительность технического обслуживания зависит от безотказности и ремонтопригодности РТС, а также от уровня организации работ и квалификации обслуживающего персонала. Она выражается в единицах времени (мин, ч, сут и т. п.).

Удельная суммарная продолжительность технического обслуживания — это отношение суммарной продолжительности технического обслуживания к наработке РТС за один и тот же период эксплуатации [27] $T_{\text{тоу}\Sigma} = T_{\text{то}\Sigma}/T_{\text{н}}$, где $T_{\text{н}}$ — наработка РТС за время t.

Трудоемкость технического обслуживания РТС — это трудозатраты на проведение одного технического обслуживания [27]. На практике определяют суммарную, среднюю и удельную трудоемкость технического обслуживания. Трудоемкость, суммарная и средняя трудоемкость выражается в человеко-часах, а удельная трудоемкость технического обслуживания — в человеко-часах на единицу наработки РТС.

Стоимость технического обслуживания — это стоимость проведения одного технического обслуживания РТС [27]. На практике определяют суммарную, среднюю и удельную стоимости технического обслуживания, под которыми понимают соответственно суммарную стоимость проведения технического обслуживания за определенный период эксплуатации, математическое ожидание суммарных затрат на проведение технического обслуживания РТС за определенный период эксплуатации, отношение средней суммарной стоимости технического обслуживания к математическому ожиданию суммарной наработки РТС за один и тот же период эксплуатации. Суммарная и средняя стоимости технического обслуживания выражаются в рублях, а удельная стоимость — в рублях на единицу наработки.

Вероятность выполнения технического обслуживания в заданное время — это вероятность того, что действительная продолжительность данного технического обслуживания РТС не превысит заданную продолжительность [27].

Коэффициент профилактичности аппаратуры [20] — это отношение числа профилактируемых отказов к полному числу отказов аппаратуры

$$K_{\text{пф}} = n_{\text{пф}}/n = n_{\text{пф}}/(n_{\text{пф}} + n_{\text{нпф}}), \tag{7.2}$$

где $n_{\text{нпф}}$ — количество непрофилактируемых отказов. Коэффициент профилактичности позволяет оценить аппаратуру с точки зрения потенциальных возможностей проведения профилактического обслуживания. Он может быть определен по статистическим данным отказов непрофилактируемой аппаратуры.

Доли профилактируемых отказов электровакуумных и полупроводниковых приборов, реле, электромоторов, резисторов или конденсаторов в процентах к общему числу из отказов соответственно равны: 60 ... 80; 40 ... 60; 50 ... 60; 40 ... 60 и 20 ... 30.

При проведении технического обслуживания не удается предотвратить все профилактируемые отказы. Для оценки качества обслуживания можно использовать *коэффициент эффективности технического обслуживания* [20]:

$$K_{\text{это}} = n_{1\text{пф}}/n = n_{1\text{пф}}/(n_{1\text{пф}} + n_{2\text{пф}} + n_{\text{нпф}}) = K_{\text{пф}} P_{\text{пф}}, \tag{7.3}$$

где $n_{1\text{пф}}$, $n_{2\text{пф}}$ — число предотвращенных и непредотвращенных профилактируемых отказов при техническом обслуживании; $P_{\text{пф}}$ — вероятность предотвращения профилактируемого отказа:

$$P_{\text{пф}} = n_{1\text{пф}}/n_{\text{пф}}. \tag{7.4}$$

Коэффициент эффективности технического обслуживания характеризует степень замены текущего ремонта аппаратуры техническим обслуживанием. Максимальное его значение равно коэффициенту профилактичности аппаратуры. Следовательно, техническое обслуживание не может полностью заменить текущий ремонт РТС.

Коэффициент эффективности технического обслуживания можно определить и из следующих выражений [20]:

$$K_{\text{это}} = (Q_{\text{но}} - Q_{\text{о}})/Q_{\text{о}}, \tag{7.5}$$

$$K_{\text{это}} = (T_{\text{о}} - T_{\text{но}})/T_{\text{но}}, \tag{7.6}$$

где $Q_{\text{но}}$, $Q_{\text{о}}$, $T_{\text{но}}$, $T_{\text{о}}$ — соответственно вероятности отказов и наработки на отказ необслуживаемой и обслуживаемой аппаратуры, взятые за один и тот же отрезок времени. При малых величинах $n_{1\text{пф}}$ по сравнению с $n_{2\text{пф}} + n_{\text{нпф}}$ все записи эквивалентны.

Таким образом, коэффициент эффективности технического обслуживания показывает также степень повышения безотказности аппаратуры за счет проведения технического обслуживания. Прирост наработки на отказ в профилактируемой аппаратуре обусловлен своевременным предупреждением отказов, которые могли бы появиться в ней при применении без обслуживания.

Экономически обоснованное решение о применении технического обслуживания должно приниматься на основании учета затрат на его выполнение. Проведение мероприятий технического обслуживания целесообразно в случае выполнения следующего неравенства [20]:

$$C_{\text{то}} < S_{\text{трем}} < S_{\text{г}}, \tag{7.7}$$

где $C_{\text{то}}$ — затраты на техническое обслуживание; $S_{\text{трем}}$, $S_{\text{г}}$ — экономия затрат соответственно при текущем ремонте и содержании аппаратуры, а также вследствие повышения безотказности и готовности аппаратуры при техническом обслуживании.

Из неравенства следует, что затраты на техническое обслуживание должны приводить к экономии по сравнению с текущим ремонтом и содержанием аппаратуры без технического обслуживания. Затраты могут оцениваться в денежном, временном или другом удобном для эксплуатирующей организации виде.

7.5. ПЕРИОДИЧНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

При организации и проведении технического обслуживания РТС необходимо учитывать способ использования аппаратуры.

Рассмотрим особенности определения периодичности технического обслуживания на аппаратуре различного использования.

В качестве основного показателя для оценки эксплуатационных свойств РТС непрерывного действия целесообразно принять коэффициент использования аппаратуры $K_{\text{ти}}$ или коэффициент простоя $K_{\text{вп}}$.

В работе [20] получено выражение для коэффициента простоя в предположении, что отказами аппаратуры контроля можно пренебречь, аппаратура контроля обеспечивает абсолютную достоверность проверок, при периодическом устранении постепенных отказов путем регулировок и замены элементов моменты появления отказов представляют собой простейший поток случайных событий

$$K_{\text{вп}} = \frac{T_{\text{то}} + \lambda T_{\text{в}} \tau_{\text{то}} + \tau_{\text{то}} - [1 - \exp(-\lambda_{\text{по}} \tau_{\text{по}})]/\lambda_{\text{по}}}{\tau_{\text{то}}}, \qquad (7.8)$$

где $T_{\text{то}}$ — средняя продолжительность одного технического обслуживания; λ — интенсивность отказов аппаратуры; $T_{\text{в}}$ — среднее время устранения одной неисправности; $\lambda_{\text{по}}$ — интенсивность постепенных отказов; $\tau_{\text{то}}$ — периодичность технического обслуживания.

При условии, что $\lambda_{\text{по}}\tau_{\text{то}} \ll 1$, из выражения для $K_{\text{вп}}$ получено соотношение для оптимальной периодичности технического обслуживания, при котором обеспечивается максимальный коэффициент использования (минимальный коэффициент простоя) системы:

$$\tau_{\text{то}} = \sqrt{2T_{\text{то}}/\lambda_{\text{по}}} = \sqrt{2T_{\text{то}}T_{\text{по}}}. \qquad (7.9)$$

На основании этого выражения построен график (рис. 7.1), по которому легко определить оптимальную периодичность технического обслуживания для непрерывно работающей аппаратуры.

Основным показателем эксплуатационных свойств РТС разового действия является вероятность безотказной работы за некоторое календарное время t:

$$P_{\text{рд}}(t) = m_{\text{и1}}(t)/m_{\text{и}}, \qquad (7.10)$$

где $m_{\text{и}}$ — общее число исправных систем в начале эксплуатации; $m_{\text{и1}}(t)$ число систем, в которых не возникло ни одной неисправности за время t.

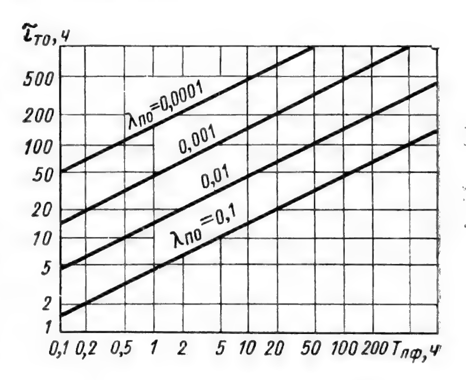


Рис. 7.1. График определения оптимальной периодичности технического обслуживания для аппаратуры непрерывного действия.

При проведении технического обслуживания главной задачей является обеспечение требуемого уровня безотказности $P_{\text{доп}}$ при минимальных затратах времени, сил и средств. Исходя из требуемого уровня безотказности $P_{\text{доп}}$ в момент использования аппаратуры, получено [20] выражение для максимального значения периодичности технического обслуживания $\tau_{\text{то макс}}$:

$$\tau_{\text{томакс}} = T_{\text{р}} - (T_{\text{о}} \ln P_{\text{доп}} + T_{\text{р}})/K_{\text{хр}}, \qquad (7.11)$$

где $T_{\text{о}} = 1/\lambda$ — наработка РТС на отказ; $T_{\text{р}}$ — время работы аппаратуры под током в стационарных условиях при подготовке ее к использованию и при техническом обслуживании; $K_{\text{хр}}$ — коэффициент пересчета времени хранения аппаратуры $T_{\text{хр}}$ ко времени $T_{\text{р}}$ (см. § 9.2). Выражение для

$\tau_{\text{то макс}}$ справедливо при следующих предположениях: потоки отказов в аппаратуре при хранении и работе под током являются простейшими; все отказы в аппаратуре устраняются только при выполнении технического обслуживания, которое позволяет определить максимальный период проведения технического обслуживания также аппаратуры, находящейся на хранении, для этого необходимо в него подставить значение $T_{\text{р}}$. Оно и позволяет найти оптимальное значение периодичности технического обслуживания $\tau_{\text{то опт}}$, но при этом необходимо подставить значение допустимой вероятности $P_{\text{доп опт}}$, которое должно быть определено из условий использования аппаратуры.

Если в качестве показателя используется минимальное значение времени простоя аппаратуры $K_{\text{вп мин}}$, то оптимальная периодичность технического обслуживания при $\lambda_{\text{хр}} T_{\text{р}} \ll 1$ будет равна [20]

$$\tau_{\text{то опт}} = \sqrt{2T_{\text{то}}[1 + T_{\text{в}}(\lambda_{\text{р}} - \lambda_{\text{хр}})]/\lambda_{\text{хр}}}, \qquad (7.12)$$

где $T_{\text{в}}$ — среднее время устранения одной неисправности; $T_{\text{то}}$ — средняя продолжительность технического обслуживания.

При выполнении условия $\lambda_{\text{р}} T_{\text{в}} \ll 1$ выражение упрощается и принимает вид, напоминающий формулу для $\tau_{\text{то}}$ аппаратуры непрерывного действия:

$$\tau_{\text{то опт}} = \sqrt{2T_{\text{то}} T_{\text{хр}}}, \qquad (7.13)$$

где $T_{\text{хр}} = 1/\lambda_{\text{хр}}$ — среднее время безотказного хранения.

Периодичность технического обслуживания дежурной аппаратуры [20, 29] зависит от назначения и специфики ее использования. Техническое обслуживание ее может проводиться в специально отведенное время, при котором отсутствует заявка на ее использование по целевому назначению.

Необходимо различать четыре случая применения дежурной аппаратуры:

— часть аппаратуры в ожидании заявки на использование непрерывно включена и находится в рабочем состоянии;

— аппаратура большую часть времени включена и находится в рабочем состоянии, а в остальное время хранится;

— аппаратура небольшую часть времени включена и находится в рабочем состоянии, а в остальное время в рабочем, но выключенном состоянии;

— аппаратура часть времени работает в облегченном режиме, а при поступлении заявки на использование начинает работать в номинальном режиме.

В первых двух случаях часть или вся аппаратура может быть приравнена к непрерывно работающим РТС. Временем хранения в этом случае можно пренебречь и периодичность технического обслуживания определится по формуле [20, 29]

$$\tau_{\text{то}} = \sqrt{2T_{\text{то}} T_{\text{по}}}. \qquad (7.14)$$

В третьем случае аппаратура может быть приравнена к аппаратуре разового действия. Максимальную и оптимальную периодичность технического обслуживания при этом необходимо вычислять по формулам [20]

$$\tau_{\text{то макс}} = T_{\text{р}} - (T_{\text{о}} \ln P_{\text{доп}} + T_{\text{р}})/K_{\text{хр}}; \qquad (7.15)$$

$$\tau^2_{\text{то опт}} = 2T_{\text{р}}[1 + T_{\text{в}}(\lambda_{\text{р}} - \lambda_{\text{хр}})]/\lambda_{\text{хр}}. \qquad (7.16)$$

В последнем случае для определения периодичности технического обслуживания можно использовать формулы предыдущего случая после подстановки в них вместо $\lambda_{хр}$ и $K_{хр}$ соответствующих величин для облегченного режима работы $\lambda_{ор}$ и $K_{ор}$.

7.6. ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Техническое обслуживание РТС проводится в сроки, определяемые нормативными документами.

Ежедневное, недельное, месячное и квартальное техническое обслуживание, как правило, выполняется силами обслуживающего персонала РТС, а полугодовое и годовое — силами обслуживающего и ремонтного персонала. На хранящейся аппаратуре и некоторых образцах дежурной техническое обслуживание проводится только силами ремонтного персонала.

Техническое обслуживание РТС проводится в специально отведенные дни. К работам в эти дни привлекается обслуживающий и ремонтный персонал, а также специалисты метрологического и материально-технического обеспечения.

Организация технического обслуживания осуществляется на основании календарных планов [26].

При планировании должны быть учтены следующие мероприятия [26]: профилактические и регламентные работы, доработки аппаратуры; устранение неисправностей и профилактическая замена элементов; проверка комплектности и исправности ЗИП, а также вспомогательного имущества; приведение в порядок рабочих помещений, хранилищ, аппаратуры; заполнение и приведение в порядок эксплуатационной документации. Кроме того, должна быть предусмотрена возможность приведения техники в заданную степень готовности в соответствии с нормами времени. Для выполнения последнего условия необходимо рассредоточивать во времени выполнение трудоемких операций на всех видах РТС.

Обслуживающему персоналу РТС на день технического обслуживания выдается план-задание, в котором должны быть указаны виды работ по каждой системе, пульту, агрегату, время выполнения каждой работы, исполнители работ, а также порядок материально-технического снабжения.

В целях внедрения наиболее эффективной технологии обслуживания техники и ее ремонта на каждый вид работ составляется техническая карта, в которой должны содержаться следующие сведения [24]: перечень и последовательность выполнения операций, затраты времени на выполнение каждой операции, необходимые для выполнения каждой операции приспособления, инструмент, материалы и измерительные приборы, условия выполнения работ с учетом требований Правил техники безопасности и научной организации труда.

Работы по обслуживанию техники состоят из трех этапов: подготовительного, основного и заключительного [25, 26].

Во время подготовительного этапа ставятся задачи исполнителям работ на весь день обслуживания техники, доставляются к местам работ ЗИП, материалы, приборы и инструмент, проводится подготовка техники и ремонтных средств, контролируются знания обслуживающим персоналом задач и правил обслуживания техники, уточняется объем и содержание работ, обеспечивается получение, изготовление, ремонт и

настройка резервных деталей и изделий, которые будут использованы при техническом обслуживании.

На основном этапе проводятся все виды работ в соответствии с планом. При этом обслуживание наиболее сложной техники и выполнение ответственных работ поручают наиболее квалифицированному инженерно-техническому обслуживающему и ремонтному персоналу.

На заключительном этапе техника приводится в исходное положение, производятся записи должностными лицами в документах о проделанных работах и выявленных неисправностях, проводится технический осмотр аппаратуры и подводятся итоги работы.

7.7. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Применение методов сетевого планирования при планировании и организации обслуживания техники позволяет улучшить качество и уменьшить сроки проведения работ, а также улучшить руководство ими [1, 8, 30].

Методы сетевого планирования позволяют:

— наглядно представить взаимную связь всех работ;

— дать четкое определение факту выполнения каждой работы и составить оптимальную последовательность их выполнения;

— определить время выполнения всех работ;

— выделить работы, являющиеся наиболее важными, и решить вопрос о перераспределении сил и средств для выполнения работ в установленный срок;

— составить обоснованный план с четкой постановкой задачи каждому исполнителю;

— осуществить эффективный контроль за ходом выполнения плана и обеспечить руководителя работ информацией, необходимой для управления.

Рассмотрим основные положения методов сетевого планирования [1, 8].

Сетевой график есть графическое представление комплекса проводимых работ. Составление и анализ сетевых графиков основывается на методах теории ориентированных графов и исследования операций.

С точки зрения теории графов сетевым графиком называется ориентированный граф, в котором имеется лишь одна вершина, не имеющая входящих ребер, и лишь одна вершина, не имеющая выходящих ребер. Каждому ребру сетевого графика приписывается число, выражающее длину этого ребра. За такое число обычно принимается время выполнения работы. Каждой вершине графа приписывается некоторое событие, в качестве которого обычно принимают факт окончания определенного вида работ по обслуживанию техники. Вершины графов отражают конечный результат работ.

Различают три вида связей между событиями: *действительная работа,* когда последующее событие может наступить после выполнения некоторого объема работ, требующего временных, трудовых и материальных затрат; *ожидание,* когда очередная работа должна выполняться оборудованием или людьми, которые заняты выполнением другой работы; *фиктивная работа,* когда имеются ограничения на выполнение работы, не требующие затрат времени и материальных средств.

Последовательность работ, в которой конец предшествующей работы совпадает с началом последующей, называется *путем. Длиной пути* называют сумму длин ребер его составляющих.

Наиболее ранний срок наступления конечного события равен длине наибольшего пути, который называют *критическим путем.* Длина критического пути называется *критическим временем* выполнения комплекса работ.

Различают два вида сетей: детерминированные и стохастические. В детерминированной сети конечное событие (окончание работ) наступает после свершения всех входящих в нее событий (завершение всех видов работ). В стохастической сети все или некоторые работы характеризуются определенной вероятностью того, что выполнение этих работ окажется необходимым для наступления конечного события сети. Детерминированная сеть есть частный случай стохастической сети. В ней вероятности необходимости выполнения работ равны единице.

Сетевые графики составляются в следующей последовательности. Прежде всего необходимо сформулировать конечную цель и определить конечное событие сетевого графика, а также составить перечень простых работ и событий. *Простой работой* называют такую, полное выполнение которой влечет за собой начало следующей работы. В качестве событий принимаются конечные результаты выполнения работ. Затем проводится нумерация и составляется список событий. События изображаются на листе бумаги в виде кружков слева направо в порядке нумерации и в приблизительном соответствии со шкалой времени. В кружке записывается буква С с цифровым индексом номера события. Кружки соединяются линиями со стрелками, изображающими ветви графа (выполняемые работы). Фиктивные работы изображаются пунктирными линиями.

Для безошибочного изображения структуры графа необходимо, чтобы он удовлетворял следующим основным требованиям:

— каждая работа должна иметь предшествующее и последующее события;

— каждое событие (за исключением начального и конечного) должно обладать предшествующей и последующей работой;

— детерминированные сети не должны содержать замкнутых контуров (петель), т. е. из события не могут выходить пути, вновь возвращающиеся в это же событие;

— сеть не должна иметь работ с одинаковыми обозначениями;

— все работы сети должны быть простыми.

Наличие событий, из которых не выходит ни одна работа, свидетельствуют о том, что результаты этой работы не нужны и она является лишней. Наличие событий, в которые не входит ни одна работа, указывает на то, что условия наступления этого события не обеспечены и оно не может свершиться. Для различия работ с одинаковыми обозначениями необходимо ввести дополнительные события и фиктивные работы.

Если какие-либо работы могут начинаться до завершения предшествующей им работы, то каждая из этих работ должна быть представлена как сумма нескольких простых работ.

Если для начала одной из работ необходимо получить результаты всех работ, входящих в событие, а для начала другой — результаты только одной или нескольких работ, то должны быть введены дополнительное событие и фиктивная работа, связывающая это новое событие с первым.

К основным параметрам детерминированных сетей относятся:

— время выполнения отдельной работы $t_{i,j}$;

— наиболее раннее из возможных $T_{рн}(j)$ и наиболее позднее из допустимых $T_{пз}(j)$ сроков наступления каждого j-го события;

— критическое время выполнения всего комплекса работы $T_{кр}$;

— заданное время окончания всего комплекса работ $t_{доп}$;

— резерв времени для события $\Delta T(j)$;

— общий резерв времени $\Delta T_{об}$;

— полный резерв времени пути $\Delta T_{п}[L_i]$ и работы $\Delta T_{рн}(j, i)$;

— свободный резерв времени отдельной работы $\Delta T_{c}(i, j)$;

— независимый резерв времени $\Delta T_{нз}(i, j)$;

— коэффициент напряженности работы $K_{н}(i, j)$.

За время выполнения отдельных работ t_{ij} принимается нормативное время, определяемое исходя из числа исполнителей, их квалификации и соответствующих норм выработки.

Наиболее ранний из возможных сроков наступления события C_j равен максимальной длине пути из события C_1 в C_j, так как к моменту наступления j-го события все работы, входящие в это событие, должны быть выполнены:

$$T_{рн}(j) = \text{макс}\, T_1(j) = \text{макс}\, T(1, j), \quad (7.17)$$

$$T_1(j) = \sum_{i \in A} (t_{s,r})_i, \quad (7.18)$$

где A — множество всех работ (C_s, C_r), составляющих $L_1(j)$ путь; $t_{s,r}$ — время выполнения работы, выходящей из события C_s и входящей в событие C_r

Для критического времени можно записать

$$T_{кр} = T_{рн}(n) = \text{макс}\, T_1(n).$$

Если $T_{кр} \leqslant t_{доп}$, составленный план работ можно считать приемлемым, в противном случае план подлежит пересмотру с целью сокращения сроков выполнения отдельных работ и уменьшения длины критического пути. Такое сокращение может быть достигнуто перераспределением сил и средств.

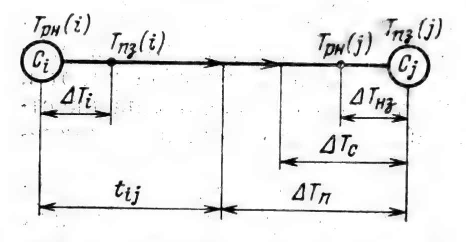


Рис. 7.2. Резервы времени работы: $\Delta T_{п}$ — полный, $\Delta T_{нз}$ — независимый и ΔT_{c} — свободный.

Значение $t_{доп}$ является наиболее поздним сроком наступления конечного события, т. е. $T_{пз}(n) = t_{доп}$. Наиболее поздним сроком наступления другого события является срок, превышение которого вызывает превышение $t_{доп}$. Поэтому наиболее поздний из допустимых сроков наступления j-го события будет равен

$$T_{пз}(j) = t_{доп} - \text{макс}\, T_2(j),$$
$$T_2(j) = \sum_{i \in B} (t_{s,r})_i, \quad (7.19)$$

где B — множество всех работ C_s, C_r, составляющих путь $L_2(j)$, который не включает j-е событие.

Величины $T_{пз}(j)$ вычисляются в порядке, обратном определению $T_{рн}(j)$, переходя от событий более поздних к более ранним.

Значения величин $t_{i,j}$, $T_{рн}(j)$, $T_{пз}(j)$ наносятся на сетевой график под соответствующими работами и событиями. Знание этих величин позволяет вычислить следующие параметры сети:

— самый ранний срок начала работы $T_{нр}(j, i) = T_{рн}(i)$;

— самый поздний срок начала работы $T_{нп}(i, j) = T_{пз}(j) - t_{ij}$;

— самый ранний $T_{ор}$ и самый поздний $T_{опз}$ сроки окончания работы:

$$T_{ор}(i, j) = T_{рн}(i) + t_{i,j},$$
$$T_{опз}(i, j) = T_{пз}(j). \quad (7.20)$$

Резерв времени для события показывает, на какой срок может быть задержано начало i-й работы (рис. 7.2):

$$\Delta T(i) = T_{пз}(i) - T_{рн}(i). \quad (7.21)$$

Общий резерв времени есть разность между заданным временем окончания работ и критическим временем $\Delta T_{об} = t_{доп} - T_{кр}$. Эта величина характеризует жесткость заданных сроков выполнения комплекса работы, а также правильность составления плана и наличие ресурсов. При $\Delta T_{об} > 0$ имеется возможность опережения календарного срока выполнения работ, а при $\Delta T_{об} < 0$ либо план плохо составлен, либо имеется недостаток в ресурсах для своевременного завершения данного комплекса работ. При $\Delta T_{об} = 0$ любая задержка работ критического пути вызывает нарушение планового срока выполнения комплекса работ.

Разность между критическим временем и длиной любого пути $L_i(n)$ называют полным резервом времени этого пути

$$\Delta T_п[L_i(n)] = = T_{кр} - T_i(n). \quad (7.22)$$

Полный резерв времени показывает, насколько могут быть увеличены продолжительности всех работ пути без нарушения сроков наступления конечного события. Увеличение продолжительности работ пути не должно превышать величины $\Delta T_п[L_i(n)]$, так как при таком превышении путь становится критическим. Продолжительность любой работы с путем, имеющим резерв времени и не совпадающим с критическим, может быть увеличена.

Полным резервом времени работы $\Delta T_п(i, j)$ называют величину, показывающую, на какое время может увеличиваться ее продолжительность (рис. 7.2):

$$\Delta T_п(i, j) = T_п(j) - - T_{рн}(i) - t_{i,j}. \quad (7.23)$$

Для любой работы, лежащей на критическом пути, полный резерв времени равен нулю. Резерв времени пути распределяется между отдельными работами лишь в пределах полных резервов времени работ.

Полный резерв времени является мерой близости пути к критическому. В случае $t_{доп} \leqslant T_{кр}$ для выполнения плана в срок необходимо уменьшить не только длину критического пути, но и путей, длина которых лежит в пределах $t < T_i(n) \leqslant T_{кр}$.

Если полный резерв работы $\Delta T_п \times \times (i, j) < \varepsilon_п$ ($\varepsilon_п$ — заданная величина отклонения от критического пути), то пути, проходящие через эту работу, называются подкритическими. Длина подкритического пути удовлетворяет неравенству $T_{кр} - \varepsilon_п \leqslant T_i(n) < T_{кр}$.

Совокупность работ, полные резервы времени которых меньше заданной величины, являются особо важными работами так называемой критической зоны.

Следует отметить, что полный резерв времени не полностью отражает напряженность сроков выполнения работ. Равные полные резервы времени могут располагаться на участках различной длины. Поэтому напряженность работ будет неодинаковой.

Свободный резерв времени работы $\Delta T_с(i, j)$ показывает, насколько может быть увеличена ее продолжительность или задержано начало работы относительно наиболее раннего из возможных наступлений события $T_р(j)$, не нарушая возможности начать все работы, выходящие из события C_j, в наиболее раннее возможное время $T_р(j)$:

$$\Delta T_с(i, j) = T_{рн}(j) - t_{i,j}. \quad (7.24)$$

Для работ, оканчивающихся на событиях, принадлежащих критическому пути, свободный резерв времени равен полному резерву.

Независимый резерв времени — это допустимое увеличение времени выполнения работы или задержки ее начала при условии, что все работы, входящие в ее начальное событие, заканчиваются в момент времени $T_п(i)$, а работы, выходящие из конечного события, начинаются в $T_р(j)$:

$$\Delta T_{нз}(i, j) = T_{рн}(j) - - T_{пз}(i) - t_{i,j}. \quad (7.25)$$

Независимый резерв времени работы может быть израсходован, не оказывая влияния на резервы времени других работ. Для работ, выходящих из событий критического пути, независимый резерв совпадает с полным резервом времени.

Резервы времени используются для оптимизации плана, контроля за его выполнением и прогнозирования хода работ с учетом происшедших и предполагаемых изменений.

Мерой напряженности работ служит коэффициент напряженности работы $K_н(i, j)$, который представляет собой наибольшее отношение длин несовпадающих отрезков максимального и критического путей, заключенных между одними и теми же событиями, принадлежащими обоим путям. Величина этого коэффициента определяется из следующих выражений:

$$K_н(i, j) = \frac{T(L_{макс}) - T'_{кр}(L_{макс})}{T_{кр} - T'_{кр}(L_{макс})}, \quad (7.26)$$

$$K_н(i, j) = 1 - \frac{\Delta T_п(i, j)}{T_{кр} - T'_{кр}(L_{макс})},$$

где $L_{макс}$ — максимальный по длине путь, проходящий через ребро C_i, C_j; $T'_{кр}(L_{макс})$ — продолжительность отрезка критического пути, совпадающего с $L_{макс}$. Коэффициент напряженности для критических работ равен единице, а для подкритических — близок к единице.

В ряде случаев нельзя пренебречь случайным характером времени выполнения работы. При этом необходимо применять вероятностный метод анализа детерминированной сети.

В общем случае время выполнения работы характеризуется законом распределения. Длины путей являются случайными величинами. Они могут быть определены как композиция законов выполнения работ пути.

По плотности вероятностей длик всех путей, соединяющих начальное и конечное события сети, можно для каждого пути вычислить вероятность выполнения планируемого комплекса работ в заданное время. При этом критическому пути будет соответствовать минимальное значение вероятности, к которой близкими будут значения вероятностей подкритических путей. Таким образом, при случайных временах выполнения работ необходимо знание всех законов распределения времен выполнения работ. Однако для практики достаточно знать только некоторые характеристики законов распределения (такие, как математическое ожидание, дисперсия).

При анализе сетевых графиков необходимо для каждой работы определить среднее время ее выполнения $T_{i,j}$ и дисперсию этого времени $\sigma^2_{i,j}$. Для β-распределения времени выполнения работы эти значения определяются по выражениям

$$T_{i,j}=(t_{\text{макс}}+4t_o+ +t_{\text{мин}})/6, \qquad (7.27)$$

$$\sigma^2_{i,j}=(t_{\text{макс}}-t_{\text{мин}})^2/36, \qquad (7.28)$$

где $t_{\text{мин}}$, t_o, $t_{\text{макс}}$ — минимально возможное, наиболее вероятное и максимально возможное время выполнения работы. Выражение для $\sigma^2_{i,j}$ является эмпирическим.

По значению $T_{i,j}$ определяются наиболее ранний и наиболее поздний сроки выполнения работ (наступления событий), определяются длина критического пути и резервы времени. Затем рассчитывается дисперсия наиболее раннего срока выполнения работ

$$\sigma^2_{i,j}=\sum_{i\in \text{макс}\, L_1(j)} (\sigma^2_{s,r})_i. \qquad (7.29)$$

Вероятность наступления конечного события сети к заданному сроку $t_{\text{доп}}$ распределена по нормальному закону в связи с большим числом работ:

$$P(t_{\text{доп}})=\int_0^{t_{\text{доп}}} W(z)\,dz = \Phi\left(\frac{t_{\text{доп}}-T_{\text{р}}(n)}{\sigma_{T_{\text{р}}(n)}}\right), \qquad (7.30)$$

где $\Phi(x)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{x}\exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)dz$ — функция Лапласа. Она должна удовлетворять условию $P(t)\geqslant P_{\text{доп}}$, где $P_{\text{доп}}$ — заданная вероятность окончания комплекса работ к заданному сроку $t_{\text{доп}}$. В случае $P(t)<P_{\text{доп}}$ по значениям $P_{\text{доп}}$ и $t_{\text{доп}}$ определяются требования к изменению времени $T_{\text{р}}(n)$ и $\sigma_{T_{\text{р}}(n)}$ по выражению

$$t_{\text{доп}}=\Gamma_{\text{р}}(n)-\xi\sigma_{T_{\text{р}}(n)}, \qquad (7.31)$$

где ξ является корнем уравнения $\Phi(x)=P_{\text{доп}}$. Затем определяются значения подкритических путей, для которых полные резервы времени близки к нулю.

Вероятность отсутствия резерва времени для момента окончания работы равна

$$P[\Delta T(j)\leqslant 0] = 1-\Phi\left[\frac{\overline{T}_{\text{п}}(j)-\overline{T}_{\text{р}}(j)}{\sigma_{T_{\text{р}}(j)}}\right]. \qquad (7.32)$$

Для события критического пути значение этой вероятности равно 0,5.

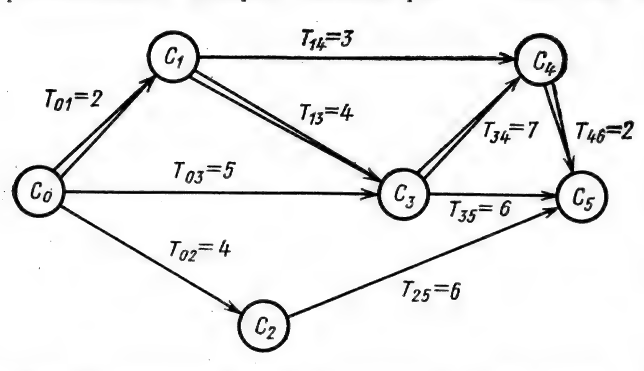


Рис. 7.3. Сетевой график технического обслуживания РТС.

Указанную вероятность необходимо вычислить для каждого события, что позволит определить степень напряженности различных путей, а следовательно, и возможности перераспределения расурсов, чтобы ослабить напряженность отдельных путей.

Пример 7.1. Пусть имеем:

— количество работ 9;

— $t_{\text{доп}}=15$ ч;

— логическую последовательность выполнения работ следующую: работы могут быть начаты перва.1, вторая и третья одновре-

Номера работы	Обозначение работы	Оценки продолжительности работы, ч			$T_{i,\ j}$, ч	$\sigma^2_{i,\ j}$, ч²	$T_{нр}(i,\ j)$, ч	$T_{нп}(i,\ j)$, ч	$T_{ор}(i,\ j)$, ч	$T_{оп}(j,t)$ ч
		$t_{макс}$	$t_о$	$t_{мин}$						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	01	3	2	1	2	0,11	0	0	2	2
2	03	6	5	4	5	0,11	0	4	5	9
3	02	6	4	2	4	0,44	0	5	4	9
4	14	4	3	2	3	0,11	2	10	5	13
5	13	6	4	2	4	0,44	2	2	6	6
6	25	12	5	4	6	1,78	4	9	10	15
7	34	8	7	6	7	0,11	6	6	13	13
8	35	8	6	4	6	0,44	5	9	11	15
9	45	3	2	1	2	0,11	13	13	15	15

менно, четвертая и пятая — после выполнения первой, восьмая и седьмая — после выполнения второй и пятой, девятая — после выполнения четвертой и восьмой, шестая — после выполнения третьей.

Составим список событий, нумеруя их с нуля:

0 — начало первой, второй и третьей работ;

1 — окончание первой и начало четвертой и пятой работ;

2 — окончание третьей и начало шестой работы;

3 — окончание второй и пятой и началало восьмой и седьмой работ;

4 — окончание четвертой и седьмой работ и начало девятой работы;

5 — окончание шестой, восьмой и девятой работ.

В соответствии с принятыми обозначениями сетевой график приведен на рис. 7.3.

Обозначим условное наименование заданных работ через $t_{i,j}$, где $i,\ j$ — номера предшествующего и последующего данной работе события. Номера работ, их обозначения и оценки параметров функции распределения $t_{мин}$, $t_о$, $t_{макс}$ приведены в таблице. Параметры распределения известны из предшествующего опыта проведения подобного рода работ или нормативов.

По данным столбцов 3, 4 и 5 определим средние значения продолжительности каждой работы $T_{i,j}$ и их дисперсии, полученные результаты занесем в графы 6 и 7 таблицы. Используя данные таблицы и рис. (7.3), определим средние длины путей из начального события в конечное:

$$T(L_1) = L_1(0,\ 1,\ 4,\ 5) =$$
$$= T_{01} + T_{14} + T_{45} = 7 \text{ ч};$$
$$T(L_2) = L_2(0,\ 1,\ 3,\ 4,\ 5) =$$
$$= T_{01} + T_{13} + T_{34} + T_{45} = 15 \text{ ч};$$
$$T(L_3) = L_3(0,\ 3,\ 5) = T_{03} + T_{35} = 11 \text{ ч};$$
$$T(L_4) = L_4(0,\ 2,\ 5) = T_{02} + T_{25} = 10 \text{ ч};$$
$$T(L_5) = L_5(0,\ 1,\ 3,\ 5) =$$
$$= T_{01} + T_{13} + T_{35} = 12 \text{ ч};$$
$$T(L_6) = L_6(0,\ 3,\ 4,\ 5) =$$
$$= T_{03} + T_{34} + T_{45} = 14 \text{ ч}.$$

Из расчета следует, что критическим путем является путь, средняя длина которого равна 15 ч. Общий резерв критического пути $\Delta T_0(L_2)$ равен нулю, что подтверждает правильность составления сетевого графика и указывает на возможность выполнения каждой из заданных работ в установленный срок.

По данным столбца 7 таблицы определим суммарную дисперсию критического пути

$$\sigma^2_{L_{кр}} = \sum_{i=\in L_{кр}} \sigma^2_{rs} = \sigma^2_{01} + \sigma^2_{13} + \sigma^2_{34} +$$
$$+ \sigma^2_{45} = 0,11 + 0,44 + 0,11 +$$
$$+ 0,11 = 0,77 \text{ ч}^2$$
$$(\sigma_{L_{кр}} = 0,86 \text{ ч}).$$

Определим вероятность выполнения всех работ в срок.

В связи с тем, что $t_{доп} = T(L_{кр})$, имеем $P(t) = 0{,}5$.

Полные резервы времени остальных путей равны

$$\Delta T(L_1) = 8 \text{ ч};\ \Delta T(L_3) = 4 \text{ ч};$$

$\Delta T(L_4) = 5$ ч; $\Delta T(L_5) = 3$ ч; $\Delta T(L_6) = 1$ ч. Используя данные графы 7 таблицы и заданное время выполнения всех работ $t_{доп} = 15$ ч, определим значения $T_{нр}(i,\ j)$, $T_{нп}(i,\ j)$, $T_{ор}(i,\ j)$, $T_{оп}(i,\ j)$. Результаты расчета указанных величин в часах, отсчитывая от начального со-

бытия, представлены в 8—11 графах таблицы.

Из анализа данных таблицы следует.

1. Путь, состоящий из работ 1, 5, 7 и 9, является критическим. Работы этого пути требуют к себе наибольшего внимания руководителей.

2. Остальные работы 2—4, 6 и 8 не лежат на критическом пути. За счет них возможен маневр силами и средствами. Маневр силами за счет работы 2 должен производиться с большой осторожностью.

3. Заданный срок выполнения всех работ может быть выполнен с вероятностью, большей чем $P(t)=0{,}5$, при условии, что большинство работ критического пути будет выполняться за время меньше среднего.

Определим, какие действия могут быть предприняты руководителем работ для увеличения вероятности $P(t)$. Эта вероятность будет расти при уменьшении среднего времени выполнения всех работ критического пути. При сокращении этого времени на $\sigma(2\sigma, 3\sigma)$ получим $P(t)=0{,}8$ (0,95; 0,99). Таким образом, сокращение среднего времени выполнения всех работ на 0,8 ... 1,6 ч приведет к высокой вероятности окончания обслуживания за установленное время $t_{доп}$.

Наибольшая возможность сокращения среднего времени заключена в работах t_{13}, t_{34}, t_{03}.

Глава 8

РЕМОНТ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

8.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА РЕМОНТА. КАТЕГОРИРОВАНИЕ И ДЕФЕКТАЦИЯ

Как показано в § 3.1, ремонт аппаратуры РТК обеспечивает продление ресурса путем устранения возникших неисправностей и отказов в результате износа или внезапной потери работоспособности отдельных деталей, узлов и устройств.

В зависимости от степени износа и старения, характера неисправностей, сложности и объема работ, необходимых для восстановления работоспособности РТС, ремонт подразделяется на текущий и восстановительный. Восстановительный, в свою очередь, может быть средним и капитальным. Он осуществляется в заранее установленные плановые сроки после наработки аппаратурой определенного нормативного количества часов, а при появлении неисправностей или отказов, проводится средний или капитальный ремонты.

РТС, контрольно-измерительные приборы, а также отдельные узлы, комплектующее оборудование и ЗИП в зависимости от технического состояния, вида требуемого для восстановления работоспособности ремонта, а также от выработки гарантийного и межремонтного ресурсов и сроков подразделяются на категории.

Перевод РТС из одной категории в другую производится по степени изменения технического состояния в соответствии с нормативными документами.

Мероприятия, проводимые с целью установления категории средств РТК, называются *категорированием*. Категорирование средств РТК производится в следующих случаях:

— по истечении гарантийного или межремонтного ресурса эксплуатации;

— при проведении или по окончании среднего и капитального ремонтов;

— при приемке и передаче средств;

— после аварий, стихийных бедствий и т. п.

Правильность категорирования проверяется специалистами. Категорированию предшествует дефектация РТС, основной задачей которой является определение уровня технического состояния, характера износа деталей, узлов и устройств и определение вида необходимого ремонта. Дефектация проводится силами обслуживающего персонала с привлечением в необходимых случаях ремонтного персонала и специалистов заводов-изготовителей РТС.

Мероприятия, проводимые с целью определения категории РТС или дефектации, называют *техническим освидетельствованием.*

8.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕМОНТНОГО ЦИКЛА

При установлении вида планового ремонта РТС, помимо учета опыта эксплуатации и ремонта аналогичной аппаратуры, принимаются во внимание следующие обстоятельства.

Техническое состояние РТС оценивается одной из установленных категорий, к которой она относится. Каждая категория РТС предполагает проведение определенного вида ремонта, восстановления и создания запаса работоспособности на следующий срок службы. Необходимость ремонта характеризуется достижением РТС некоторого предельного состояния.

В зависимости от назначения, особенностей выполняемых функций предельные состояния, характеризующие технический ресурс до данного вида ремонта, для РТК наступают, когда:

— значения показателей надежности при принятой системе технического обслуживания достигают или могут выходить за установленные для них границы;

— стоимость единицы выполненной работы (единицы полученной информации) при эксплуатации РТС в связи с ее износом и моральным старением становится выше стоимости использования новой РТС аналогичного назначения;

— затраты на эксплуатацию РТС становятся бо́льшими по сравнению с затратами на эксплуатацию новой аналогичной РТС.

Первый вид предельного состояния обычно используется для определения сроков службы и сохраняемости РТС, к которой предъявляются высокие требования по надежности и выход из строя которой может причинить большой ущерб или создать опасность для жизни людей.

Второе предельное состояние используется при установлении ремонтного цикла такой РТС, для которой важна стоимость единицы выполненной работы.

Третий вид предельного состояния можно использовать при определении срока службы РТС, используемой для создания условий работы или обслуживания в процессе эксплуатации других технических средств.

Задача определения периодичности ремонтов относится к классу экстремальных задач, для которых может быть применен аппарат оптимальных решений.

В качестве математических моделей, используемых для установления периодичностей плановых ремонтов, применяются модели, построенные на использовании аппарата математического анализа, теорий восстановления и марковских процессов с доходами. Однако аппарат математических моделей для оптимизации периодичностей ремонтов сложных РТК недостаточно разработан для практического использова-

ния. В этих случаях сроки проведения ремонтов чаще всего определяются исходя из принятых ограничений.

Модели определения периодичностей плановых ремонтов можно построить с использованием различных данных о техническом состоянии РТС: априорной и апостериорной информаций, априорных данных и назначения фактических сроков по результатам текущей информации.

Различают две методики установления периодичностей ремонтов: дифференциальную и интегральную. При первой — предельное техническое состояние РТС определяется по предельному состоянию составляющих ее элементов. При второй — предельное состояние РТС определяется по совокупному воздействию изменений параметров работоспособности элементов на параметры РТС в целом.

Применение той или иной математической модели, характера исходной информации и методики решения задачи зависит от конкретных условий. Независимо от выбранных методов решения задачи определение периодичностей различных видов ремонтов осуществляется по следующей схеме:

— установление условий решения задачи (конструктивные и эксплуатационные особенности, полнота знаний о характере и значениях параметров изменения технического состояния, вид используемой информации, возможность формулирования и решения задачи как экстремальной);

— формулирование задачи и выбор вида математической модели для ее описания;

— выбор показателей оптимизации решения или ограничений;

— математическое описание задачи;

— определение количественных значений величин, входящих в уравнения;

— выбор метода вычислений и решение задачи;

— проверка областей допустимости полученного решения.

Рассмотрим расчетно-аналитический интегральный метод определения межремонтных сроков, разработанный проф. Волковым П. Н.

Этот метод применим при учете следующих обстоятельств:

— определяющим показателем технического состояния РТС является показатель ее работоспособности, например, безотказность;

— используются приближенные данные показателей работоспособности элементов РТС без учета точных статистических данных;

— математический аппарат для описания задачи как экстремальной не разработан.

В качестве основного показателя технического состояния РТС принята вероятность потери работоспособности к заданному моменту времени t_i не более m элементов из полной n их совокупности:

$$Q(m, n, t_i) \leqslant Q_{\text{доп}}. \tag{8.1}$$

В общем случае для определения этой вероятности используется соотношение

$$Q(m, n, t_i) = \sum_{k=1}^{m} Q_k(n, t_i), \tag{8.2}$$

где $Q_k(n, t_i)$ — вероятность того, что за время t_i из совокупности n элементов потеряет работоспособность ровно k элементов. Выражение для $Q_k(n, t_i)$ зависит от объема полной совокупности n элементов, подлежащих ремонту.

При большой совокупности ($n>10$) и соблюдении соотношения $\lambda_i \ll \Lambda$ для определения $Q_k(n, t)$ используются формулы Пуассона:

$$Q_k(n,t) = \frac{[\omega(t)]^k}{k} \exp[-\omega(t)],$$

$$Q_k(n,t) = \frac{(\Lambda t)^k}{k!} \exp(-\Lambda t), \tag{8.3}$$

где $\omega(t)$ — параметр потока отказов (среднее число элементов, теряющих работоспособность за время t из совокупности n); λ — интенсивность отказов для невосстанавливаемых элементов (параметр потока отказов для восстанавливаемых элементов).

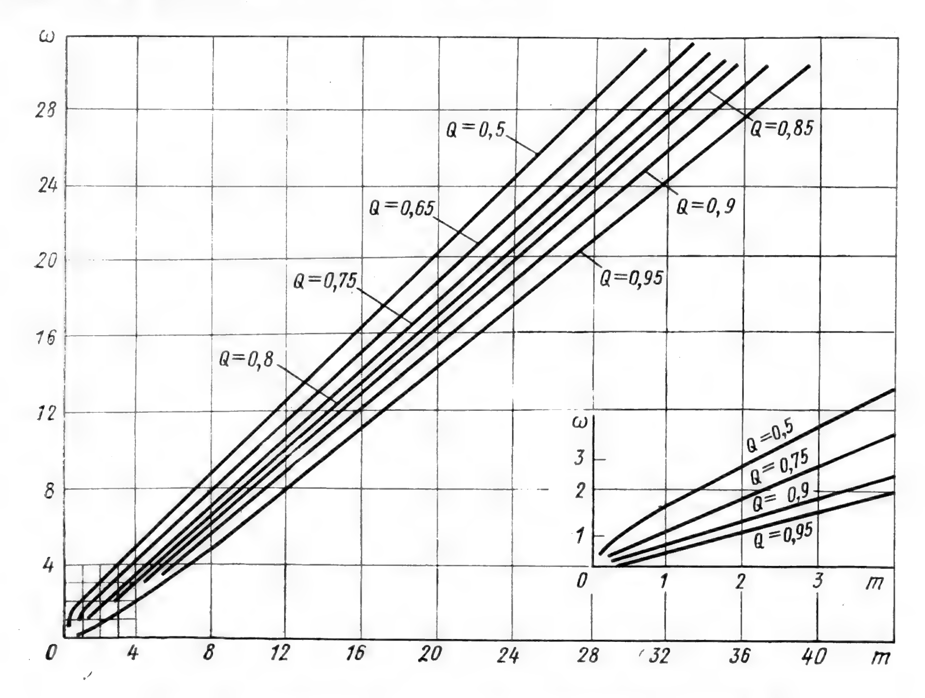


Рис. 8.1. Зависимость ω от m при различных значениях Q.

Первое выражение получено при нестационарном, а второе — при простейшем потоке потери работоспособности элементов. Последний случай применим для сложных и высоконадежных средств, к которым относятся РТС. Следовательно, для них имеем

$$Q(m, n, t_i) = \sum_{k=1}^{m} \frac{(\Lambda t_i)^k}{k!} \exp(-\Lambda t_i). \tag{8.4}$$

Для упрощения решения задачи строится график зависимости ω от $m (\omega = \lambda t)$ при различных значениях $Q(m, n, t)$ (рис. 8.1). Для определения ремонтного цикла $\tau_{мр}$ по формуле (8.4) необходимо знать допустимое значение $R(m, n, t)$ и величину m. По этим значениям из графи-

ка определяется величина $\omega=\lambda t$, из которой получаем значение ремонтного цикла:

$$\tau_{мр}=\omega/\Lambda. \qquad (8.5)$$

Значение величины $R(m, n, t)_{доп}$ обычно принимается равным 0,9 или 0,95. Предельное количество отказывающих элементов m определяется из совокупности n ремонтируемых элементов: $m=\mu_o n$. В последнем выражении коэффициент μ_o определяется по статистическим данным, а при их отсутствии может быть принят равным 0,003 ... 0,03 для текущего; 0,08 ... 0,13 для среднего; 0,18 ... 0,35 для капитального ремонтов. По мере накопления опыта эксплуатации и ремонта значения μ_o уточняются и корректируются m, а следовательно, и межремонтные сроки.

По значениям $\tau_{мр}$ для текущего и среднего ремонтов проверяется условие, по которому определяющий показатель надежности не должен выходить за установленные границы.

Ремонтные циклы РТС, прошедших капитальный ремонт, сокращаются на 20 ... 30%.

Параметры работоспособности элементов, параметры потока отказов или интенсивности отказов могут определяться расчетным путем.

При этом должны использоваться следующие зависимости:

$$\lambda(t)=f(t)/P(t),$$

$$\omega(t)=f(t)+\int_0^t f(t-z)\,\omega(z)\,nz, \qquad (8.6)$$

где $\lambda(t)$ — интенсивность отказов невосстанавливаемых элементов; $\omega(t)$ — параметр потока отказов восстанавливаемых элементов; $P(t)$ — вероятность безотказной работы элемента.

В качестве $f(t)$ при учете постепенных и внезапных отказов используется распределение Эрланга k-го порядка

$$f_k(t)=\frac{\lambda(\lambda t)^k}{k!}\exp(-\lambda t), \qquad (8.7)$$

где $\lambda=(k+1)/t_o$, $D=(k+1)/\lambda^2$, t_o — средний срок службы элемента, определяемый расчетным путем.

Обычно $k=1$, когда

$$\lambda=2/t_o,\ D=2/\lambda^2,\ f(t)=4t[\exp(-2t/t_o)]/t_o^2. \qquad (8.8)$$

В этом случае $\omega(t)=[1-\exp\times(-4t/t_o)]/t_o$. При достаточно большом периоде эксплуатации

$$\lim_{t\to\infty}\omega(t)=1/t_o=\lambda. \qquad (8.9)$$

При использовании статистических данных по отказам элементов оценки интенсивности потока отказов определяются по формулам математической статистики с учетом характера испытания, по данным которого оцениваются значения этих величин.

Если за рассматриваемый период эксплуатации $t_э$ значения $\lambda(t)$ или $\omega(t)$ значительно не изменяются, то вычисляются их средние значения:

$$\overline{\lambda(t)}=\sum_{i=1}^{k}\lambda_i\Delta t_i\Bigg/\sum_{i=1}^{k}\Delta t_i=\sum_{i=1}^{k}\frac{\lambda_i\Delta t_i}{t_э}, \qquad (8.10)$$

где k — число интервалов, на которые разбит весь рассматриваемый период; Δt_i — длина каждого интервала.

Когда условия использования элементов в РТС отличаются от условий, для которых определялись значения λ_i, они должны быть пересчитаны в соответствии с условиями использования.

Например, если значения λ_i определялись для условий интенсивного использования в длительной непрерывной работе, а предполагается использование РТС с длительными перерывами в работе, то определяется взвешенное значение

$$\hat{\lambda}_i(t)=(\lambda_{ip}\,t_p+\lambda_{ixp}\,t_{xp})/(t_p+t_{xp}), \qquad (8.11)$$

где λ_{ip} и λ_{ixp} — интенсивности отказов элементов при работе и хранении; t_p и t_{xp} — значения времени работы и хранения за некоторый период эксплуатации (например, год).

Если за рассматриваемый период предусматривается k режимов использования РТС, то

$$\hat{\lambda}_i(t)=\sum_{i=1}^{k}\lambda_i\,t_i\sum_{i=1}^{k}t_i. \qquad (8.12)$$

При определении ω_{xp} можно использовать приближенные зависимости

$\omega_{xp} = K_c \omega_p$, где K_c — коэффициент, учитывающий интенсивность старения элементов.

$K_c = 0{,}01 \dots 0{,}1$ — для элементов интенсивного старения (радиоэлементы); $0{,}01 \dots 0{,}001$ — для элементов со средним старением (пневмо и гидроэлементы); $0{,}001 \dots 0{,}0001$ — для элементов с низким старением (механические элементы).

По установленным значениям $\omega_i(t)$ или ω_i определяются их значения для каждой j совокупности элементов

$$\omega_j(t) = \sum_{i=1}^{n_j} \omega_i. \qquad (8.13)$$

Значения ω_i и ω_j выражаются в единицах измерения межремонтных сроков (единицах наработки или календарного времени эксплуатации).

Пример 8.1. Имеем высоконадежную наземную радиотехническую станцию с циклическим характером работы. Станция состоит из подсистем: механической (АФУ, регистрирующее устройство, система вентиляции); электрорадиотехнической (приемное устройство, декодирующее устройство, схема разделения сигналов).

Определим межремонтные сроки по интегральной схеме.

В результате анализа установлено, что в процессе эксплуатации необходимо проводить текущий, средний и капитальный ремонты. Возможными режимами эксплуатации являются 12 и 84 цикла работы в год.

Длительность работы механической подсистемы за цикл — 24 мин, электромеханической — 92 мин.

В результате анализа конструкции системы и расчетов значений показателей надежности определено количество элементов n_j различных групп. По данным опыта ремонта аналогичных станций определены значения μ_0 и m_j.

Количественные данные приведены в таблице.

Величины	Вид ремонта		
	текущий	средний	капитальный
n_j	4,78	1,67	90
μ_0	0,03	0,115	0,3
m_j	14	18	27

Результаты расчета даны в следующей таблице.

Принимаем $R_{доп} = 0{,}95$. По значениям m_j и $R_{доп}$ определяем из графика (рис. 8.1) значения ω_j, а по формуле (8.5) — $\tau_{j\,мр}$ для различных режимов эксплуатации. Значения этих величин приведены в таблице.

Из таблицы видно, что сроки периодичности ремонтов зависят от режима эксплуатации станции.

Подсистемы	Значения n			Значения $\lambda_j \cdot 10^6$ для режимов эксплуатации					
	$n_{тек}$	$n_{ср}$	$n_{кап}$	$\lambda_{тек}$		$\lambda_{ср}$		$\lambda_{кап}$	
				12	84	12	84	12	84
Механическая	230	129	72	152 683	929 781	90 426	494 837	35435	181 089
Электрорадиотехническая	248	38	18	11 954 975	12 889 248	5 133 661	5 565 892	3 169 084	3 398 988
Всего:	478	167	90	12 107 658	13 813 029	5 224 087	6 060 729	3 204 519	3 480 077

Примечание. n — количество элементов, подвергшихся определенному виду ремонта.

Вид ремонта	ω_j	Режим эксплуатации, цикл/год	λ_j, отказ/год	$\tau_{j\,мр}$, год	
				Расчетный срок	Установленный срок
Текущий	10,6	12 84	12,108 13,813	0,87 0,77	1 0,5
Средний	14,1	12 84	5,224 6,061	2,7 2,3	3 2
Капитальный	22	12 84	3,204 3,480	6,9 6,3	7 6

8.3. МЕТОДЫ ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА

При текущем ремонте РЭА применяют следующие четыре метода [20]:

— замена невосстанавливаемого элемента;

— замена элемента с последующим его восстановлением;

— подключение резервного элемента;

— проведение профилактического обслуживания.

Первый метод ремонта применяется в случае отказа невосстанавливаемых элементов: резисторов, конденсаторов, электровакуумных и полупроводниковых приборов и модулей, а также плат с печатным монтажом. Ремонт заключается в замене отказавшего исправным элементом из состава ЗИП.

Одиночные конденсаторы, резисторы, электровакуумные и в особенности полупроводниковые приборы не являются оптимальными невосстанавливаемыми элементами по объему и составу, так как на отыскание и устранение их неисправностей затрачивается много времени и отыскание неисправностей доступно только обслуживающему персоналу высокой квалификации.

Замена модуля более экономична, чем его восстановление, поэтому перспективная аппаратура проектируется в модульном исполнении. Встроенные индикаторы неисправности модулей почти исключают потребность в высококвалифицированном персонале. Однако применение модульной конструкции предполагает включение отдельных резисторов и конденсаторов, электровакуумных и полупроводниковых приборов в качестве согласующих элементов схемы. Поэтому обслуживающий персонал обязан знать признаки неисправностей и способы их обнаружения.

Ремонт методом замены и последующего восстановления элемента (агрегатный метод ремонта) проводится для повышения готовности РТС. При этом в качестве восстанавливаемых элементов применяются модули, платы, блоки и агрегаты. Этот метод ремонта по сравнению с первым обеспечивает значительное сокращение времени бездействия аппаратуры (времени ремонта), а следовательно, повышает коэффициент готовности аппаратуры.

Сокращение времени ремонта происходит за счет упрощения отыскания неисправной части схемы, а также уменьшения времени замены.

Ограничением этого метода ремонта является увеличение стоимости элементов ЗИП из-за большого числа дорогостоящих запасных блоков, плат, модулей. Увеличение стоимости должно быть компенсировано выигрышем в степени готовности аппаратуры к применению.

Ремонт методом подключения резервного элемента [34] является разновидностью ремонта без отключения аппаратуры. Запасной элемент устанавливают заранее. При отказе основного элемента его функции выполняет запасной. Фактическая работа по устранению неисправности основного элемента откладывается до какого-то момента в будущем. Как и во втором случае, применение этого метода связано с большими экономическими затратами. Кроме того, этот метод ремонта сопровождается увеличением сложности схемы РТС, а также усложнением контроля из-за необходимости проверок резервных цепей.

Метод профилактического обслуживания является интересным методом текущего ремонта [34]. Он заключается в замене исправного элемента другим элементом из состава ЗИП на основании данных прогно-

зирования его отказа. Такой метод применим только для элементов, обладающих профилактируемыми отказами. К профилактируемым относятся все постепенные, а также часть внезапных отказов, закон распределения времени безотказной работы которых является функцией наработки элемента при наличии последней. Обоснованная профилактическая замена элементов вызывает необходимость знания законов распределения времени их безотказной работы.

8.4. ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА

Различают четыре формы организации текущего ремонта РТС [25, 26]:

— силами обслуживающего персонала;
— силами ремонтного органа;
— силами выездного персонала;
— силами обслуживающего и ремонтного персонала.

Сравнение различных форм организации текущего ремонта может быть проведено по двум показателям: коэффициенту готовности и стоимости эксплуатации.

В первом случае оценка дается на основании выражения для коэффициента простоя РТС $K_{вп}$ во время ее транспортирования в ремонтный орган и обратно (следование ремонтного персонала):

$$K_{вп}=2\lambda T_д/[1-2\lambda T_д+k/(m-k)], \qquad (8.9)$$

где λ — интенсивность отказов одной РТС; $T_д$ — среднее время доставки РТС в ремонтный орган и обратно; m — количество эксплуатируемых РТС; k — среднее число РТС, находящихся в ремонте.

Если коэффициент простоя для ремонта аппаратуры в ремонтных органах оказывается больше коэффициента простоя, рассчитанного для ремонта на месте установки, то целесообразнее выполнять ремонт силами обслуживающего персонала, в противном случае — силами ремонтного органа или выездного ремонтного персонала. Для более полной оценки различных форм ремонта следует учитывать также стоимость эксплуатации РТС при выполнении ремонта. На практике часто используется ремонт, производимый совместно обслуживающим и ремонтным персоналом. При этом мелкие неисправности устраняются силами обслуживающего персонала, а крупные — силами ремонтного органа или выездного ремонтного персонала. Такая форма организации ремонта наиболее приемлема для РТК, оснащенных аппаратурой различного назначения. Для повышения уровня организации ремонта составляется план ремонта [25]. Исходным материалом для составления планов среднего и капитального ремонтов являются данные технических осмотров, систематическое обобщение статистических данных о характеристиках аппаратуры по записям обслуживающего персонала в технической документации, а также наблюдения обслуживающего персонала.

Перед проведением ремонта проводятся подготовительные работы, к основным из них относятся [26]: составление ведомости дефектов, определение объема ремонтных работ, составление и согласование с руководителями изменений в схемах и конструкциях узлов, составление и утверждение смет, обеспечение финансирования намеченных работ, составление плана организации работ и подбор ремонтного персонала.

Если для выполнения ремонта требуется прекращение работы РТК, то время ремонта РТС согласовывается с вышестоящей организацией.

РТС в ремонт сдает по акту организация или подразделение, эксплуатирующее ее, а приемку в ремонт производит ремонтное предприятие или ремонтное подразделение эксплуатирующей организации [22]. В акте сдачи в ремонт указываются техническое состояние и комплектность РТС. С актом передаются паспорт и (или) формуляр, а также аварийный акт (при сдаче в ремонт РТС после аварии).

Сдавать РТС в ремонт разрешается после выработки назначенного ресурса до среднего (капитального) ремонта или среднего срока службы между средними (капитальными) ремонтами, а также в более длинные сроки, определяемые по результатам оценки фактического технического состояния.

РТС с дефектами базовых частей, устранение которых не предусмотрено нормативной документацией, а также с дефектами, возникшими в результате аварии или нарушения правил эксплуатации, принимаются в ремонт только по соглашению с ремонтными предприятиями.

РТС, передаваемые в ремонт, очищаются от грязи, предохраняются от коррозии, механических и других повреждений, укомплектовываются составными частями, предусмотренными конструкторской документацией.

По окончании ремонта все работы принимаются по акту специальной комиссией, назначаемой руководителем эксплуатирующей или ремонтной организации [26].

К выпускаемой из ремонта РТС прилагаются: паспорт и (или) формуляр предприятия изготовителя с отметкой о выполненном ремонте, акт о выдаче РТС из ремонта, акт испытаний, предусмотренных нормативной документацией, документ о консервации и упаковке. Допускается вместо документов делать записи в формуляре РТС.

Ремонтный орган обязан выпускать РТС из ремонта исправными и гарантировать их работоспособность в течение определенных сроков.

Глава 9

ХРАНЕНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

9.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХРАНЕНИЯ

Хранение — это режим эксплуатации системы в промежутке времени, не связанным с ее применением, который обеспечивает поддержание всех надежностных, технических и эксплуатационных характеристик системы в пределах норм, отвечающих техническим условиям. В зависимости от задач, хранение может различаться условиями и продолжительностью. Условия могут быть складскими, лабораторными, полевыми и пр.

Продолжительность хранения в значительной мере определяется назначением аппаратуры. Например, некоторые типы РЛС могут длительное время находиться в рабочем режиме и останавливаться только для проведения профилактических мероприятий. В то же время бортовая аппаратура РТС однократного применения может длительное время находиться в выключенном состоянии, а период работы ее весьма непродолжителен.

Опыт хранения показывает, что при хранении под воздействием большого числа внешних и внутренних факторов параметры элементов и радиодеталей аппаратуры претерпевают изменения, а следовательно, изменяются и выходные параметры РТС, что приводит к выходу их значений за пределы допусков, установленных в технической документации. Причем эти изменения могут быть достаточно большими и приводить к отказу. Таким образом, РТС на этапе хранения обладает определенной надежностью, называемой сохраняемостью.

Отказ аппаратуры может наступить на любом этапе эксплуатации, однако вполне очевидно, что все отказы проявляются только в рабочем режиме, поэтому отказы при хранении иногда относят к отказам, возникающим за счет переходных режимов при включении РТС, что упрощает оценку надежности системы в целом.

По времени проявления следует разделять отказы, возникшие в процессе хранения, и отказы, возникшие на этапе применения. Такое разделение будет оказывать существенную помощь при анализе отказов с целью выявления причин их возникновения.

В качестве показателей сохраняемости в [19] рекомендуется использовать «средний срок сохранности» и «гамма-процентный срок сохранности».

Под *средним сроком сохранности* понимается среднее время, в течение которого изготовитель гарантирует сохранение работоспособности РТС с тактико-техническими характеристиками, установленными технической документацией, при условии соблюдения правил хранения. Среднее время сохранности для каждого вида техники указывается в технической документации на каждый образец.

Гамма-процентный срок сохранности [19] представляет собой такой срок сохранности, который имеет или превышает в среднем обусловленное число (γ-гамма) процентов изделий данного типа. Гамма-процентный срок сохранности используется для оценки условий хранения сравнительно больших партий однотипной техники, элементов и радиодеталей.

Однако использование только этих показателей не в полной мере отражает сущность эксплуатации на этапе хранения. Поэтому для инженерной оценки сохранности пользуются дополнительными показателями: вероятностью безотказного хранения, готовностью РТС при хранении, удельной стоимостью хранения и удельными трудозатратами на поддержание заданных условий хранения.

Под вероятностью безотказного хранения $P(t_{\text{хр}})$ понимают вероятность исправного состояния РТС после заданного срока хранения $T_{\text{хр}}$.

Готовность РТС при хранении определяет ее способность при хранении к переводу из режима хранения в режим непосредственного применения по целевому назначению. Готовность при хранении характеризуется средним временем перевода РТС в режим непосредственного применения. В случаях эксплуатации одинаковой техники различными обслуживающими составами обычно среднее время перевода используют в качестве критерия для сравнения условий организации хранения и степени квалификации данного обслуживающего персонала.

Показатели — удельная стоимость хранения и удельные трудозатраты, необходимые для поддержания требуемых условий хранения, служат для оценки различных условий хранения (лабораторных, складских, полевых и пр.) при одинаковой заданной надежности при хранении. Эти показатели принято относить к одному образцу техники.

В зависимости от предполагаемого срока хранения для РТС установлены два вида хранения: кратковременное (сроком до трех месяцев) и длительное (сроком более трех месяцев). На длительное хранение ставятся резервные, сверхкомплектные, а также РТС, не введенные в эксплуатацию, например, в момент строительства технических зданий. На кратковременное хранение ставятся все агрегаты и системы в случае перерыва в их работе либо при ожидании отправки в ремонт или в другие организации.

Во всех случаях на хранение ставятся только технически исправные и укомплектованные РТС, имеющие документацию установленного образца (паспорта, формуляры, укладочные ведомости, технические описания, инструкции по эксплуатации и пр.). При постановке на хранение они проходят контрольные испытания и консервацию. Контрольные испытания проводят путем включения РТС в работу на режимах, характерных для ее нормального применения, с целью выявления и последующего устранения выявленных неисправностей.

9.2. УСЛОВИЯ ХРАНЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СОХРАНЯЕМОСТЬ РТС

Во всех случаях нахождения РТС в режиме хранения их обслуживание организуется так, чтобы в дальнейшем обеспечивалось безотказное применение их по целевому назначению.

Совместное воздействие различных факторов окружающей среды на надежность РТС в процессе всей эксплуатации было рассмотрено в § 2.3. Такое воздействие при хранении может привести к некоторому изменению значений параметров различных элементов и радиодеталей, которое может не вызвать отказа в режиме хранения, но привести к нему в момент включения или через некоторое время работы РТС. Следовательно, надежность РТС во время работы является также функцией условий и времени предшествующего хранения. В то же время при работе РТС могут так измениться параметры ее элементов, что обусловит появление отказа на этапе последующего хранения. Поэтому между режимами эксплуатации хранения и непосредственного применения существует определенная связь, а численные значения сохраняемости и надежности являются взаимозависимыми.

Для количественной оценки надежности РТС при хранении (сохраняемости) целесообразно использовать такую же систему критериев, что и для оценки надежности аппаратуры при работе. Такой подход облегчает изучение свойств РТС во время режима хранения, потому что полностью сохраняются формулировки, физическое содержание и основные расчетные соотношения теории надежности. При этом следует иметь в виду, что показатели сохраняемости являются показателями надежности.

Исследования процесса хранения РЭА показывают, что при непродолжительных сроках хранения вероятность безотказного хранения имеет экспоненциальный закон распределения

$$P(t_{\text{хр}}) = \exp(-\Lambda_{\text{хр}} t_{\text{хр}}). \qquad (9.1)$$

Анализ статистики интенсивности отказов при хранении показывает, что зависимость $\Lambda_{\text{хр}}$ имеет по форме такой же вид, что и зависимость $\Lambda_{\text{р}}$. Для периода нормального хранения можно считать $\Lambda_{\text{хр}} = \text{const}$.

Для количественной оценки сохраняемости в этом случае надо определить интенсивность отказов при хранении через коэффициент пересчета по известной интенсивности отказов при работе:

$$K_{хр}=\Lambda_{хр}/\Lambda_{р}. \tag{9.2}$$

Величина коэффициента пересчета $K_{хр}$ для современной РЭА приближенно оценивается значениями [32]

$$K_{хр}=10^{-2}\dots10^{-3}.$$

Вполне очевидно, что величина интенсивности отказов при хранении $\Lambda_{хр}$ во многом определяется условиями хранения. Изменение условий хранения всегда приводит к изменению $\Lambda_{хр}$.

Методика расчета количественной оценки сохраняемости с учетом сказанного аналогична методике расчета надежности простых систем при работе (как показано в § 2.1).

В РТС с большим сроком хранения при проверках наблюдается значительное количество постепенных отказов из-за старения элементов и радиодеталей. Число таких отказов может доходить до 50% от общего числа отказов [4, 32]. В этом случае время безотказной работы распределяется по нормальному закону, а вероятность появления постепенного отказа элемента за время t определяется зависимостью

$$Q_э(t)=0{,}5+\Phi(z), \tag{9.3}$$

где $\Phi(z)=\frac{1}{2\pi}\int\limits_0^z \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)dx$ — интеграл вероятности. $z=(t-T_о)/\sigma$,

где $T_о$ — наработка на отказ; σ — среднеквадратическое отклонение времени наработки между отказами элемента от его среднего значения.

Вероятность безотказной работы элемента аппаратуры запишется в виде

$$P_э(t)=1-Q_э(t)=0{,}5-\Phi(z), \tag{9.4}$$

а вероятность безотказной работы при условии, что постепенные отказы элементов в ней взаимонезависимы, можно записать

$$P_{пост}(t)=\prod_{i=1}^{N}[0{,}5-\Phi(z)]_i, \tag{9.5}$$

где N — число элементов, отказы которых приводят к отказу РТС.

Считая внезапные и постепенные отказы взаимонезависимыми, общую оценку надежности РТС с учетом длительного хранения можно представить следующим выражением:

$$P_{общ}(t)=P_{внез}(t)P_{пост}(t)=\exp\left(-t\sum_{j=1}^{M}\lambda_{хрj}\right)\prod_i^N[0{,}5-\Phi(z)]_i, \tag{9.6}$$

где M — число элементов РТС, внезапно отказавших; N — число элементов РТС с постепенным отказом.

При длительном хранении в результате процессов старения происходит ухудшение технических характеристик радиоэлементов и деталей, приводящих к появлению в РТС постепенных отказов, поэтому устанавливают предельный срок хранения.

Предельным сроком хранения $T_{\text{хр п}}$ называют такой срок, по истечении которого РТС непригодна к дальнейшей эксплуатации. Так как скорость старения материалов и элементов зависит от воздействия внешних условий, то и предельный срок хранения указывается только для вполне конкретных условий хранения. Однако на практике величина предельного срока хранения используется редко. Обычно в технической документации на радиодетали и элементы устройств оговаривается условия хранения данного образца и определяется гарантийный срок хранения, в течение которого элементы или РТС сохраняют свои технические и эксплуатационные характеристики в пределах нормы.

Для примера в табл. 9.1 приведены гарантийные сроки хранения некоторых радиодеталей и элементов.

Таблица 9.1

Гарантийные сроки хранения некоторых радиодеталей и элементов

Наименование	Гарантийный срок хранения в годах
Электровакуумные приборы	10...12
Транзисторы	8,5...10
Полупроводники	8,5...10
Резисторы	6,5...10
Конденсаторы	5...11
Реле	6...8,5
Кварцевые резонаторы	5,5
Трансформаторы	8...11
Разъемы	10...11
ВЧ дроссели	8,5

Чередование режимов непосредственного применения и хранения в общем случае может приводить к самым разнообразным воздействиям на аппаратуру РТС и ее надежность. При этом встречается следующая ситуация. РТС проверяется и в момент окончания проверки t_0 находится в исправном состоянии. После проверки РТС выключают (хранение в дежурном режиме). Работа РТС начинается в момент t_1 через некоторое время ($t_{\text{хр}}=t_1-t_0$) после окончания проверки.

Никаких проверок исправности РТС после включения для работы не производится. Требуется определить вероятность безотказной работы РТС на интервале $\Delta t=t_2-t_1$, где t_2 — момент окончания работы.

При включении аппаратуры в момент времени t_1 возникают переходные процессы, которые могут привести к отказам. В большинстве практических случаев изменение надежности из-за влияния переходных процессов является постоянной величиной, не зависящей от времени эксплуатации, времени и условий предшествующего хранения. Поэтому их влияние можно учесть введением соответствующих вероятностей исправного состояния РТС во время всех переходных процессов при включении и выключении системы:

$$P_{\text{вкл}}(t)=1-Q_{\text{вкл}}(t),$$

$$P_{\text{выкл}}(t)=1-Q_{\text{выкл}}(t), \quad (9.7)$$

где $Q_{\text{вкл}}(t)$ и $Q_{\text{выкл}}(t)$ — соответственно вероятности появления отказа за время всех переходных процессов при включении и выключении.

Вероятности $P_{\text{вкл}}(t)$ и $P_{\text{выкл}}(t)$ определяются только экспериментально, хотя и при таком определении очень трудно разделить эти величины. Эта трудность вполне очевидна, если учесть, что отказы проявляются лишь в рабочем состоянии, а моменту включения предшествует момент предыдущего выключения. Поэтому обычно эти вероятности объединяют и считают их произведение известной величиной для данной РТС — $P_{\text{пер}}(t)$ (вероятность появления отказа в РТС из-за влияния переходных процессов).

Таким образом, выражение для вероятности безотказной работы РТС с учетом предшествующего хранения может быть записано в виде

$$P_{\text{р}}(t)=P_{\text{хр}}(t)P_{\text{пер}}(t)P(\Delta t), \quad (9.8)$$

где $P(\Delta t)$ — вероятность безотказной работы РТС на интервале Δt в режиме применения при условии, что после хранения и в момент включения РТС была исправной (без учета влияния переходных процессов). При этом предполагается, что величины $P(\Delta t)$ и $P_{\text{пер}}(t)$ статистически независимы.

Исходя из последнего предположения, произведение $P_{\text{пер}}(t)P(\Delta t)=P(t, \zeta)$ можно представить как вероятность безотказной работы в зависимости от суммарной наработки и количества циклов «включено — выключено», которая определяется по формулам (2.9).

9.3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОХРАНЯЕМОСТИ РТС

При организации хранения учитывается различная чувствительность РЭА и ее элементов к воздействию всевозможных факторов. РЭА хранится как в отапливаемых помещениях и хранилищах, так и в неотапливаемых приспособленных помещениях, под навесами и в палатках, в кузовах и прицепах автомашин, а также на открытых площадках.

Оптимальные условия, рассчитанные на весьма длительное хранение радиоаппаратуры: отапливаемые помещения, в которых поддерживается температура воздуха, близкая к 0°С (+2 ... +5°С), относительная влажность не выше 70% и отсутствие в воздухе загрязняющих примесей [4, 32].

Подвижные агрегаты питания практически менее чувствительны к изменениям температуры, но требуют защиты от прямого воздействия атмосферных осадков, поэтому хранение данной техники можно организовать и под навесами.

Места хранения (хранилища, склады, навесы, площадки) должны иметь подъездные пути, освещение и грозозащитные устройства и быть обеспечены первичными средствами пожаротушения. Электрооборудование в местах хранения надежно заземляется в соответствии с требованиями мер безопасности.

Хранилища должны иметь устройства для поддержания необходимых температурно-влажностных условий (отопление и вентиляцию) и приборы для контроля температуры и влажности.

Окна хранилищ оборудуются приспособлениями для защиты от воздействия прямых солнечных лучей и атмосферных осадков (жалюзи, козырьки, занавески и т. п.). Полы в хранилищах могут быть бетонные, плиточные или деревянные крашеные. Цементные и земляные полы из-за появления пыли не допускаются.

Размещение РТС должно обеспечивать свободный доступ для расчехления, осмотра и проведения профилактического технического обслуживания. Для удобства обслуживания, свободного передвижения пожарных расчетов и быстрой эвакуации имущества в случае пожара следует оставлять рабочие (шириной 1,5 ... 2 м) и смотровые (шириной 0,5 ... 0,7 м) проходы. Наименьшее расстояние до конструктивных элементов здания или теплоизолирующих приборов должно быть не менее 1 м.

При хранении приборов РЭА на стеллажах последние должны быть закрыты занавесками для предохранения приборов от пыли.

Обычно отдельные помещения (комнаты) хранилищ отводятся под хранение групповых и ремонтных ЗИП, а также под хранение радиодеталей и элементов россыпью. Элементы ЗИП хранятся в укладочных ящиках (или в заводской упаковке), уложенных в штабеля. Индивидуальный ЗИП, как правило, размещается непосредственно на системах.

Отдельно от РЭА в специально оборудованных помещениях хранятся аккумуляторные батареи и гальванические элементы. Неэксплуатировавшиеся батареи хранятся без электролита в сухозаряженном состоянии. Бывшие в эксплуатации хранятся с электролитом, в этом случае они должны быть полностью заряжены, а уровень и плотность электролита доведены до нормы.

Для предотвращения вредной сульфатации пластин такие батареи необходимо ежемесячно подзаряжать и раз в три месяца подвергать

контрольно-тренировочному циклу (заряд — разряд — заряд). Кислотные и щелочные батареи хранятся отдельно.

Расходные материалы, предусмотренные ведомостями комплектации и ведомостями ЗИП, хранятся в погребах или кладовых в таких условиях, чтобы они постоянно находились в кондиционном состоянии и были готовы к использованию.

Сохраняемость РТС обеспечивается выполнением ряда мероприятий, которые можно объединить в два вида работ, направленных на:

— поддержание условий хранения и сбережения;

— профилактическое обслуживание и контроль технического состояния при хранении.

В целях создания и поддержания определенных условий хранения и сбережения РЭА, требуемых для обеспечения длительной ее сохраняемости, необходимо осуществлять следующие технические мероприятия:

— консервацию;

— использование средств осушки;

— поддержание температурно-влажностного режима в хранилищах;

— защиту РЭА от биологических вредителей.

Консервация. Весьма часто приходится хранить аппаратуру под навесом, на открытых площадках или в легких неотапливаемых сооружениях. Чтобы обеспечить приемлемую надежность РТС при таких условиях хранения, принимают ряд мер, называемых консервацией. Консервацию применяют и при хранении техники в отапливаемых хранилищах, особенно при длительном хранении.

Под *консервацией* понимается комплекс технических мероприятий, проведение которых обеспечивает длительную сохраняемость РЭА. Степень консервации зависит от условий хранения, характера воздействия окружающей среды и от длительности предстоящего хранения.

Консервацию РЭА следует производить в подготовленном для этой цели чистом помещении при температуре не ниже 12°С и относительной влажности не выше 50%. Необходимо, чтобы аппаратура, подвергающаяся консервации, имела температуру помещения, в котором она консервируется, для чего ее заблаговременно вносят внутрь помещения.

Простейшим видом консервации, применяемым на практике для защиты от воздействия внешних факторов, является смазка. Консервация начинается с тщательной очистки агрегатов, систем, комплектующих элементов и ЗИП от пыли, грязи и ржавчины, а при необходимости производится осушка.

Сначала восстанавливается нарушенная окраска техники, удаляется старая смазка с неокрашиваемых и трущихся поверхностей. Затем производится осмотр и устранение всех замеченных неисправностей. После этого производится двукратное покрытие неокрашенных поверхностей разогретой смазкой, причем температура смазки при втором покрытии должна быть на 20 ... 30°С ниже, чем при первом покрытии. После остывания смазанные поверхности и детали покрываются пергаментной водонепроницаемой бумагой и при возможности обвязываются шпагатом. Эта бумага предотвращает высыхание, окисление и запыление консервирующей смазки.

Элементы, для которых нельзя применить горячую смазку (электронные лампы, полупроводниковые приборы, реле и т. п.), находящиеся не в упаковке, тщательно обертываются двумя слоями парафинированной бумаги, обвязываются шпагатом и покрываются парафином для

предотвращения проникновения влаги из атмосферы. При этом детали одного наименования объединяются в группы и консервируются вместе. Покрытие парафином обычно производится путем опускания полученных пакетов в расплавленный парафин. Подобная герметизация иногда достигается применением многослойного покрытия с помощью лака или красок.

Консервация становится не только бесполезной, но и вредной, если она применяется для влажных или неочищенных от грязи элементов и радиодеталей.

Кожаные изделия (ремни, застежки, манжеты и пр.) при консервации смазывают амуничной смазкой.

Резиновые изделия (кабели, амортизаторы, шланги и пр.) при консервации отмываются от грязи, следов масла и других нефтепродуктов и насухо вытираются. Для предотвращения склеивания мест соприкосновения при хранении их пересыпают и протирают тальком.

Рассмотренный вид консервации предохраняет технику в течение 12 ... 18 месяцев. При более длительном хранении покрытие должно периодически обновляться. Такой процесс обновления иногда называют переконсервацией.

Когда РЭА снабжается укладочными ящиками длительного использования, они могут быть использованы при консервации аппаратуры. Помещаемые в ящики приборы дополнительно защищаются обертыванием в парафинированную бумагу, в пленки из полихлорвинила и другие подобные материалы. Изготовленные должным образом укладочные ящики могут служить хорошим вспомогательным средством складского хранения аппаратуры при условии тщательной проклейки щели между крышкой и ящиком.

Аппаратура, для которой техническими условиями не оговорено использование укладочных ящиков, при консервации может храниться в мягких чехлах с малой газонепроницаемостью. Материалом таких чехлов служит металлическая фольга, парафинированная или битумная бумага, синтетические пленки и т. п. Швы и соединения чехла после размещения в нем аппаратуры тщательно заделываются.

Все практически используемые для чехлов материалы не являются полностью газонепроницаемыми. Поэтому с течением времени давление паров воды внутри чехла и в окружающем пространстве постепенно выравнивается. Интенсивность этого процесса определяется влажностью и температурой окружающей среды, свойствами и толщиной материала чехла. Расчеты показывают, что для наиболее распространенных материалов приемлемой толщины выравнивание условий внутренней и внешней среды происходит за несколько суток. Это заставляет применять дополнительную защиту аппаратуры от влаги, для чего внутри чехлов помещают влагопоглотители.

При необходимости длительного хранения в неблагоприятных и тяжелых условиях элементы РЭА, не подлежащие частым проверкам, хранят в запаянных металлических контейнерах. В этом случае максимальное приближение к идеальным условиям хранения может быть достигнуто заполнением контейнеров инертным газом (очищенным азотом) при малых давлениях.

Хранение аппаратуры, смонтированной в специальных кузовах автомашин и прицепов, в принципе не отличается от хранения аппаратуры в укладочных ящиках. Дополнительными мероприятиями является консервация автомобильной техники.

Использование средств осушки. Влагопоглотители (сорбенты) применяются для поглощения избытков влаги в помещениях хранилищ, в укладочных ящиках, чехлах, прицепах и кузовах автомашин. В настоящее время широко используются твердые сорбенты, такие, как силикагель, алюмогель и др. Это стекловидные зернистые пористые вещества.

Наибольшей сорбционной влагоемкостью обладают силикагели, представляющие собой обезвоженный и прокаленный гель кремниевой кислоты (SiO_2nH_2O). В зависимости от величины пор силикагели разделяются на мелко- и крупнопористые, а по форме зерен — на кусковые и гранулированные. В гранулированном мелкозернистом силикагеле в качестве упрочняющей добавки против растрескивания вводится 4...10% окиси алюминия.

Эффективность адсорбции увеличивается с понижением температуры сорбента, повышением относительной влажности воздуха, уменьшением размера частиц сорбента и уменьшением толщины его слоя. Крупнопористый силикагель активен к парам воды только при высокой влажности воздуха (более 70%), поэтому он применяется весьма редко. А в интервале влажности 30...60% сорбционная влагоемкость мелкопористых силикагелей в 3...5 раз выше, чем у крупнопористых.

Твердые сорбенты размещаются в специальных карманах чехлов, закладываются в определенных местах хранилищ или стеллажей, иногда мешочки или патроны с сорбентом укрепляют в отдельных местах конструкции РТС.

Необходимое количество сорбентов определяется либо расчетным, либо опытным путем. Для поддержания относительной влажности внутри хранилищ не выше 60...70% не следует доводить увлажнение силикагеля более 20...25%. Увлажненность силикагеля определяется анализом или по индикатору силикагеля, цвет которого в зависимости от влажности меняется от синего до розового. Для этого силикагель окрашивают 3%-ным водным раствором хлористого кобальта. Тогда высушенный силикагель имеет синий цвет, а при насыщении влагой цвет переходит в розовый. После увлажнения силикагель может быть регенерирован прокаливанием его в сушильном шкафу при температуре 150...170°С и вновь применен для осушки.

Более эффективным влагопоглотителем следует считать твердожидкий сорбент — хлористый кальций ($CaCl_2$). Он является более дешевым, так как представляет собой продукт отхода производства соды. Весовая и объемная влагопоглощающая способность его в 10...20 раз выше, чем у силикагелей. По мере увлажнения он изменяет свое безводное твердое состояние, переходя постепенно в жидкое состояние.

Высокая сорбционная эффективность, химическая устойчивость, инертность к углекислому газу, нелетучесть, нетоксичность, отсутствие запаха, низкая стоимость и недефицитность — вот преимущества $CaCl_2$ перед другими сорбентами, благодаря которым имеется возможность широко использовать его в компактных, простых и экономичных установках для осушки воздуха.

С использованием хлористого кальция могут быть созданы воздухоосушители (адсорберы) двух основных типов:

— непереснаряжаемые установки, в которых осуществляется осушение воздуха и периодическая регенерация сорбента, для чего к ним требуется подвод энергии;

— переснаряжаемые установки, в которых осушение воздуха обеспечивается сорбентом, заливаемым в расплавленном виде в осушительные кассеты.

Кассеты размещаются вертикально в осушительных камерах, по которым снизу вверх проходит увлажненный воздух. По мере поглощения влаги из воздуха сорбент переходит в жидкое состояние и стекает вниз. Время от времени производится замена кассет и регенерация получившегося жидкого сорбента. Такие установки отличаются простотой конструкции, надежностью работы и возможностью функционирования без потребления энергии при конвективном осушении воздуха хранилищ.

Поддержание температурно-влажностного режима в хранилищах. Контроль условий при хранении в основном сводится к систематическому наблюдению за температурой и влажностью воздуха в хранилищах. Значения этих параметров непрерывно регистрируются самопишущими термографами и гидрографами, показания которых периодически проверяются по контрольному ртутному термометру и психрометру.

Измеренные значения температуры, влажности и данные метеосводки, характеризующие условия погоды в районе расположения хранилища, дают возможность обслуживающему персоналу принимать решения об изменении режима отопления и вентиляции для обеспечения оптимальных условий хранения. Чтобы принять решение о целесообразности проветривания, вентиляции или дополнительном отоплении хранилищ, необходимо определить, как изменяются температурно-влажностные параметры воздуха внутри хранилища в результате выполняемых мероприятий.

Для определения этих параметров используется так называемая Id диаграмма влажного воздуха. Она представляет собой взаимосвязь основных параметров влажного воздуха, таких, как:

— теплосодержание (энтальпия) I [Дж/кг], определяющее количество тепла, содержащегося во влажном воздухе, масса которого 1 кг;

— относительная влажность φ [%], представляющая отношение количества водяных паров, содержащихся в воздухе, к их количеству, насыщаемому воздух при данных температуре и давлении;

— влагосодержание d[г/кг], определяющее массу водяных паров, находящихся во влажном воздухе, масса сухой части которого 1 кг;

— температура воздуха t[°С].

Для удобства пользования диаграмма построена в косоугольной системе координат с углом между осями 135°, что обеспечивает лучшее использование площади диаграммы. Количество водяных паров, которое может максимально находиться в воздухе при соответствующей его температуре, зависит от атмосферного давления, поэтому каждая диаграмма строится для определенного значения давления.

В качестве примера на рис. 9.1 представлена Id диаграмма для давления воздуха, равного $101{,}3\cdot10^3$ Па (760 мм рт. ст.), которое является среднегодовым для центральной полосы СССР. Диаграмма построена следующим образом.

По оси ординат отложены величины I, по вспомогательной горизонтальной оси, проведенной для сокращения размеров диаграммы, вместо оси абсцисс — величина d. Линии I и d образуют основную координатную сетку. На диаграмму нанесены также линии, имеющие t=const (изотермы) и φ=const.

Изотермы идут слева направо в верхней половине диаграммы и представляют приблизительно прямые линии, так как зависимость I от d при t=const характеризуется уравнением

$$I=0{,}242t-0{,}001d\times(595+0{,}47t), \qquad (9.9)$$

где 0,242 — удельная теплоемкость сухой части воздуха [Дж/кг·град]; 595 — скрытая теплота парообразования [Дж/кг]; 0,47 — удельная теплоемкость водяного пара [Дж/кг·град].

Линии постоянной относительной влажности φ=const представляют собой пучок кривых, расположенных между осью ординат, являющейся линией φ=0% (абсолютно сухой воздух), и линии насыщения φ=100%.

Построение линии постоянной относительной влажности производится с использованием зависимости вида

$$d=\frac{622\cdot7{,}5\cdot10^{-3}}{100B/\varphi P_s-1}\ [\text{г/кг}], \qquad (9.10)$$

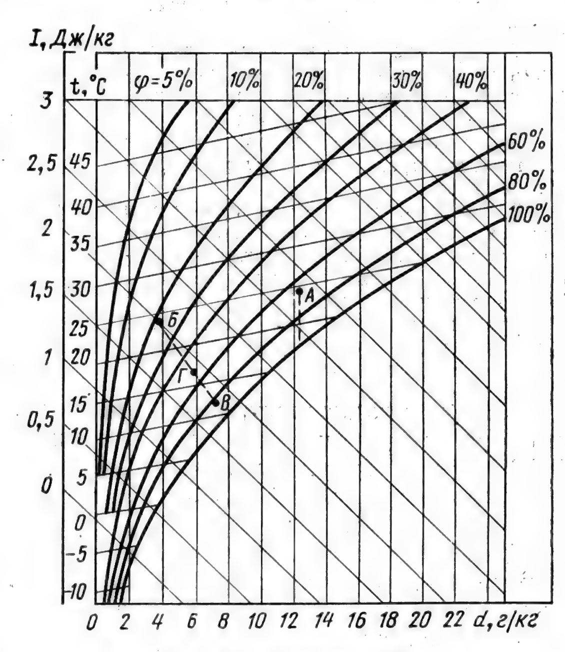


Рис. 9.1. Диаграмма Id.

где B — атмосферное давление, Па P_s — давление насыщения, Па.

В интервале температур от 0 до 50°С величина P_s может быть приближенно вычислена по эмпирической формуле

$$P_s = 5 + 3{,}3 \cdot 10^{-2} t^2, \qquad (9.11)$$

где t — температура воздуха, °С.

Зависимости (9.10) и (9.11) позволяют построить кривые постоянной относительной влажности $\varphi = \text{const}$ для любых значений температуры влагосодержания воздуха.

Рассмотренная Id диаграмма используется для поддержания в хранилищах температурно-влажностных режимов, обеспечивающих наилучшим образом сохраняемость РЭА. При этом решаются следующие задачи.

Пример 9.1. Дано: параметры наружного воздуха и температура воздуха в хранилище. Определить возможность вентилирования хранилища.

Допустим, в хранилище поддерживается температура +15°С. Следовательно, такая же температура будет у внутренней поверхности стен хранилища и хранимой техники. Температура наружного воздуха +24°С, а относительная влажность $\varphi = 65\%$.

Решение. 1. На диаграмме рис. 9.1 определяем точку A, характеризующую состояние наружного воздуха. Она соответствует точке пересечения прямой постоянной температуры +24°С с кривой постоянной относительной влажности.

2. Определяем точку росы для наружного воздуха. Для этого из точки A, характеризующей состояние воздуха, проводим вертикальную линию до пересечения с кривой $\varphi = 100\%$ и по шкале температур определяем точку росы, равную +17°С.

3. Сравниваем температуры точки росы и поверхностей стен хранилища, приборов и техники. Из сравнения видно, что при данных условиях вентилировать хранилище нельзя, так как на стенах и на технике будет выделяться конденсат влаги (точка росы выше температуры в хранилище).

4. Если при данных условиях необходимо вентилирование, то перед ним следует предварительно поднять температуру в хранилище выше 17°С.

Пример 9.2. Дано: параметры воздуха хранилища и наружного воздуха. Требуется путем вентиляции обеспечить заданную температуру в хранилище.

Пусть в хранилище температура воздуха +24°С, а относительная влажность 20%. Наружный воздух имеет температуру +12°С и влажность 80%. Объем хранилища 3000 м³. Производительность вентиляционной установки 5000 м³/ч. Требуется в результате вентиляции получить в хранилище температуру, равную 16°С и определить продолжительность работы вентиляторов.

Решение. 1. На диаграмме рис. 9.1 определяем точки, характеризующие состояния внутреннего и наружного воздуха, аналогично пункту 1 решения примера 9.1. На рисунке — это точки $Б$ (воздух хранилища) и $В$ (наружный воздух).

2. Отрезок прямой $БВ$ содержит точки, характеризующие параметры смешанного воздуха, компонентами смеси которого являются наружный воздух и воздух хранилища.

3. На пересечении отрезка $БВ$ с изотермой $t° = 16$°С точка $Г$ является характеристикой параметров воздуха хранилища в результате вентиляции (т. е. $t° = 16$°С и $\varphi = 50\%$).

4. Определяем необходимое количество приточного вентиляционного воздуха. Для этого масштабной линейкой замеряем отрезки $БГ$ и $ВГ$ и составляем пропорцию

$$\frac{БГ}{ВГ} = \frac{X}{V}, \text{ откуда } X = V\,\frac{БГ}{ВГ},$$

где X — объем приточного вентиляционного воздуха; V — объем хранилища; $БГ = 14$ и $ВГ = 10$ мм на рис. 9.1; $X = 3000\,(14/10) = 4200$ м³.

5. Продолжительность вентиляции равна

$$t_{\text{вент}} = 4200/5000 = 0{,}84 \text{ ч} \approx 50 \text{ мин.}$$

Защита радиоэлектронной аппаратуры от биологических вредителей. Одним из существенных внешних факторов, воздействующих на РТС при хранении, являются биологические вредители. Из них наиболее опасны грызуны. Борьба с ними осуществляется механическими, химическими и биологическими способами.

Механические способы направлены на уничтожение грузынов с помощью механических приспособлений (ловушек, капканов, западней, мышеловок) или предотвращение проникновения их внутрь хранилищ и станций. Мерами предотвращения проникновения служат герметизация сооружений, заделывание щелей в хранилищах, обивка низа ворот

и дверей жестью, установка в дверях и воротах защитных порогов, обитых жестью высотой 40 ... 50 см, установка защитных козырьков из жести на стойках стеллажей с имуществом и на подставках под рессорами кузовов и прицепов, установка на стеллажах металлических сеток с ячейками размером до 3 мм, укладка кабелей в закрытых траншеях и т. п.

Химические способы борьбы заключаются в применении приманок и различных продуктов, пропитанных ядами (мышьяковистокислым натрием, крысидом, фтористым натрием и др.), а также в размещении вблизи сооружений и хранилищ различных пахучих веществ, отпугивающих грызунов (нафталина, карболовой кислоты, креозота и др.). Для отравы грызунов используют также борное и фосфорное тесто, негашеную известь, смешивая их с сахаром.

Биологические способы — содержание на складах и в хранилищах кошек для борьбы с грызунами.

При наличии на территории около хранилищ и технических зданий нор грызунов следует применять химический беcприманочный способ уничтожения. Для этого производят опыление нор парижской зеленью или мышьяковистокислым кальцием или закладывают в норы паклю (вату), пропитанную хлорпикрином.

В хранилищах и помещениях рекомендуется применять преимущественно механические способы борьбы.

К мерам уничтожения насекомых вредителей относится дезинсекция хранилищ различными растворами (керосиновым, известково-купоросным, табачным раствором, жидкостью Малинина и т. д.). Растворами следует опрыскивать из гидропультов стены, потолки и полы хранилищ. Перед этим имущество должно быть убрано или тщательно прикрыто от попаданий растворов. После дезинсекции помещения просушиваются и проветриваются.

При обнаружении на деревянных предметах и ящиках червоточины в начале ее распространения следует тщательно очистить пораженные места, пропитать их скипидаром или антисептиком (креозотовым маслом, сланцевой смолой, берестовым дегтем и др.), зашпаклевать отверстия и заново окрасить весь предмет. Если червоточина вызвала разрушение дерева, то предметы, пораженные такой червоточиной, необходимо уничтожить (сжечь).

Аналогичные меры применяются для уничтожения грибков плесени (дезинфекция хранилищ, обработка пораженных предметов растворами и ядохимикатами, уничтожение предметов из древесины, сильно пораженных плесенью). В качестве дезинфицирующих жидкостей чаще всего используются:

— водный раствор медного купороса и парижской зелени;

— 2 ... 3% водный раствор хлорамина;

— 2 ... 3% водный раствор формальдегида;

— 3 ... 5% водный раствор карболовой кислоты.

При поражении резиновых изделий плесенью необходимо очистить их от пыли и грязи, промыть теплой водой и поврежденные места продезинфицировать 1 .. 2% водным раствором формалина. После этого резина насухо вытирается и присыпается тальком.

9.4. ПРОФИЛАКТИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АППАРАТУРЫ ПРИ ХРАНЕНИИ

Профилактическое обслуживание, как указывалось ранее (см. гл. 7.6), выполняется с целью поддержания РТС в исправном состоянии, предупреждения отказов в режиме хранения и продления технического ресурса. При определении периодичности и объема профилактических мероприятий по обслуживанию хранимой техники исходят из следующих противоречивых требований.

С точки зрения уменьшения затрат на хранение необходимо устанавливать большие интервалы времени между сроками обслуживания и уменьшать объемы проводимых мероприятий, но это приводит к уменьшению вероятности исправного состояния системы к моменту начала ее применения, что уменьшает эффективность РТС. С другой стороны, слишком частые проверки увеличивают затраты, уменьшают технический ресурс и увеличивают вероятность появления отказов, так как РТС проверяется в рабочем состоянии, а интенсивность отказов при этом выше, чем в режиме хранения. Кроме того, следует учитывать влияние переходных процессов при включении и выключении РТС, а также возможные ошибки обслуживающего персонала в процессе проверок.

Методика определения периодичности профилактических работ, организация профилактического технического обслуживания аппаратуры при хранении рассмотрены в § 7.3 и 7.4.

Одной из основных задач при проверке хранящихся РТС является контроль их технического состояния, зависящий как от условий хранения, так и от качества обслуживания. Основные характеристики технического состояния, представленные на рис. 9.2, подвергаются контролю при проверке систем.

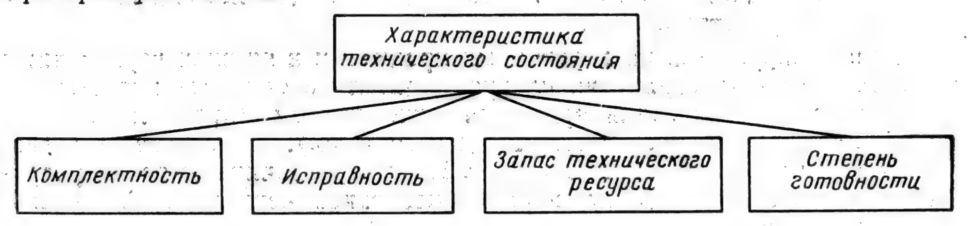


Рис. 9.2. Характеристики технического состояния.

При контроле качества хранимых РТС работа проводится в три этапа: определяются техническое состояние РТС, техническое состояние ЗИП и состояние эксплуатационно-технической документации. По каждому этапу выставляется частная оценка качества хранения. В конце проверок на основе оценок выводится общая оценка технического состояния РТС при хранении. При этом частная оценка технического состояния РТС является определяющей. Во время хранения всегда организуется контроль технического состояния РЭА с целью:

— проверки качества хранимых РТС, т. е. проверки соответствия их тактико-технических характеристик заданным в технической документации;

— проверки соответствия условий хранения заданным в технических условиях, т. е. проверки качества работы обслуживающего персонала, обеспечивающего хранение.

Для определения как технического состояния РТС, так и соответствия условий хранения, установлены следующие виды проверок: сезонные, периодические, итоговые и целевые.

Целью таких проверок является принятие одного из двух альтернативных решений:

— техническое состояние хранимых РТС считается удовлетворительным (положительное решение);

— техническое состояние хранимых РТС считается неудовлетворительным (отрицательное решение).

Для получения результатов и выводов при решении задач проверки небольшого количества хранимых РТС обычно контролю подвергаются все 100% проверяемых систем.

При проверке большого количества хранимых РТС контролю подвергается только часть их, а результаты и выводы проверки получают при использовании статистических методов контроля, рассмотренных в § 9.5.

Оценку технического состояния РТС при хранении (при всех методах проверок) можно получить путем проведения двух разновидностей контроля:

— по качественным признакам;

— по количественным признакам.

При контроле по качественным признакам все проверяемые РТС разбиваются на две группы: с удовлетворительным (исправным) состоянием и неудовлетворительным (неисправным) состоянием. Общая оценка технического состояния РТС или результатов контроля определяется в этом случае по величине в контролируемом объеме доли образцов с неудовлетворительным состоянием, которая сравнивается с величиной установленного оценочного норматива, представляющего собой допустимое количество образцов с неудовлетворительным техническим состоянием во взятом контролируемом объеме.

При контроле по количественным признакам для каждой контролируемой РТС определяют один или несколько количественных параметров. Общую оценку и результаты проверки получают из статистических характеристик распределения количественных показателей параметров контролируемых образцов, для чего среднее значение и дисперсию распределения параметров сравнивают с установленными значениями оценочных нормативов.

На практике из-за простоты чаще применяется контроль по качественным признакам. Для уменьшения возможности принятия субъективных оценок технического состояния проверяемых РТС необходимо использовать методы статистического контроля, позволяющие получить объективные решения по результатам проведенных проверок.

9.5. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИ ПРОВЕРКАХ

При различных видах проверок из-за большого объема требуемой работы и ограниченности числа инспектирующих лиц редко удается в заданные сроки осуществить 100%-ный контроль. В этом случае из всей контролируемой совокупности РТС проверяется некоторое определенное количество однотипных экземпляров, называемое *выборкой* n. О главных характеристиках контролируемой совокупности судят по полученным характеристикам выборки.

Рассматриваемые методы контроля можно также применять при инспектировании крупных организаций, при оценках отдельных видов работ обслуживающего персонала, при проверках знания им обязанностей или инструкций и т. д.

В случае 100%-ного контроля аппаратуры в зависимости от целей и требований к проверяемой совокупности задается величина оценочного норматива $\psi_{кр}$ и определяется доля ψ образцов с неудовлетворительным состоянием. Если $\psi > \psi_{кр}$, то принимается отрицательное решение по результатам контроля.

При использовании статистических методов в каждой выборке определяется число X образцов с неудовлетворительным состоянием, которое и сравнивается с оценочным числом C. Если $X > C$, то принимается отрицательное решение по результатам контроля о всей совокупности. Разумеется, по контролируемым выборкам истинная величина доли образцов с неудовлетворительным состоянием ψ во всей проверяемой совокупности неизвестна, поэтому задаются две величины ψ_1 и ψ_2, где ψ_1 — допустимая доля образцов с неудовлетворительным состоянием; ψ_2 — недопустимая доля образцов с неудовлетворительным состоянием.

При этом возможны статистические ошибки I и II родов, обусловливающие определенный риск контролируемой организации и инспектирующей комиссии.

Ошибка I рода возникает, когда в результате контроля принимается отрицательное решение по выборке $X > C$, в то время как для всей совокупности $\psi < C$. Это может произойти, если в выборке случайно оказалось значительное число образцов с неудовлетворительным состоянием. Вероятность принятия отрицательного решения при допустимой доли образцов с неудовлетворительным состоянием во всей совокупности называется *риском контролируемой организации* и обозначается α.

Ошибка II рода возникает, когда принимается положительное решение по выборке $X < C$, в то время как для всей совокупности $\psi > C$. Это может произойти, если в выборке случайно оказалось лишь несколько образцов с неудовлетворительным состоянием либо в выборке они случайно отсутствуют. Вероятность такого неправильного решения называется *риском инспектирующей комиссии* и обозначается β.

Значения ψ_1, ψ_2, α и β назначаются в результате обсуждения до проведения проверки.

Статистические методы контроля могут быть трех видов: однократная выборка (одноступенчатый контроль), двукратная выборка (двухступенчатый контроль), последовательный анализ.

При методе однократной выборки определение объема выборки n и величины оценочного числа C производится по предварительно построенной оперативной характеристике плана контроля. Под оперативной характеристикой плана контроля понимается зависимость вероятности $P(\psi)$ положительного решения, принятого по выборке, от ψ доли образцов с неудовлетворительным состоянием в проверяемой совокупности.

Вероятность положительного решения $P(\psi)$ равна вероятности того, что число X в выборке меньше или равно оценочному числу C

$$P(\psi) = P(X \leqslant C) = \sum_{i=0}^{C} P(X=i), \quad (9.12)$$

где $P(X=i)$ — вероятность того, что число образцов с неудовлетворительным состоянием точно равно i.

Оперативная характеристика плана контроля $P(\psi)$ зависит от закона распределения случайной величины X.

Когда объем выборки n превышает 10...25% от всей совокупности (что возникает при небольшом количестве проверяемых РТС), то результаты зависят от отдельных проверок. В этом случае в качестве закона распределения X

принимается гипергеометрическое распределение

$$P(X=i)=\binom{i}{M}\binom{n-i}{N-M}\Big/\binom{n}{N}, \quad (9.13)$$

где $\binom{x}{y}$ — число сочетаний из y по x; $i=0, 1, 2\ldots$; N — общее число образцов в совокупности; $M=\psi N$ — общее число образцов с неудовлетворительным состоянием во всей совокупности. Гипергеометрическое распределение дает хорошее приближение к действительности, но имеет три параметра (N, M, n), что затрудняет составление таблиц и пользование ими.

Когда объем выборки n меньше 10% от всей совокупности, то отдельные проверки считаются практически независимыми и в качестве закона распределения X используется биномиальное распределение

$$P(X=i)=\binom{i}{n}\psi^i(1-\psi)^{n-i}. \quad (9.14)$$

В этом случае распределение имеет два параметра (n, ψ), поэтому проще составление и пользование таблицами.

Когда объем выборки n меньше 10% от всей совокупности и доля образцов в ней с неудовлетворительным состоянием ψ меньше 10%, то используют распределение Пуассона с параметром $q=n\psi$:

$$P(X=i)=q^i/i!\exp(-q)=$$
$$=(n\psi)^i/i!\exp(-n\psi). \quad (9.15)$$

Подставив в (9.12) соответствующее распределение для случайной величины X, получим требуемую оперативную характеристику плана контроля, зависящую от трех параметров ψ, n, C.

Для определения объема выборки n и оценочного числа C с учетом значений вероятностей ошибок I и II рода имеем

$$P(\psi_1, n, C)=1-\alpha,$$
$$P(\psi_2, n, C)=\beta. \quad (9.16)$$

Например, при использовании распределения Пуассона будем иметь следующую систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned}\sum_{i=0}^{C}\frac{(\psi_1 n)^i\exp(-\psi_1 n)}{i!}&=1-\alpha,\\ \sum_{i=0}^{C}\frac{(\psi_2 n)^i\exp(-\psi_2 n)}{i!}&=\beta.\end{aligned}\right\} \quad (9.17)$$

По заданным значениям ψ_1, ψ_2, α, β можно вычислить n и C. Решение этой системы в явном виде затруднительно. Обычно решение получают подбором таких значений n и C, чтобы суммы в левых частях имели значения, равные правым частям.

При методе двукратной выборки контроля устанавливаются объемы двух выборок n_1 и n_2 и три оценочных числа C_1, C_2, C_3.

Если при первой выборке число образцов с неудовлетворительным состоянием меньше оценочного числа $X_1<C_1$, то принимается положительное решение и контроль на этом заканчивается. Если же при первой выборке получают $X_1>C_2$, то принимается отрицательное решение и контроль на этом заканчивается. Когда в первой выборке получают $C_1<X_1<C_2$, то берется вторая выборка объемом n_2, которая контролируется по тому же плану контроля. Затем определяется общее число образцов с неудовлетворительным состоянием в двух выборках X_1+X_2, которое сравнивается с третьим оценочным числом C_3 (иногда $C_3=C_2$). Если $(X_1+X_2)\leqslant C_3$, принимается положительное решение о результатах контроля. Если $(X_1+X_2)>C_3$, принимается отрицательное решение.

Оперативная характеристика плана контроля при двухвыборочном контроле определяется следующим образом:

$$P(\psi)=\sum_{i=0}^{C_1}P_1(X_1=i)+$$
$$+\sum_{i=C+1}^{C_2}\left[P_1(X_1=i)\sum_{j=0}^{C_3-i}P_2(X_2=j)\right]. \quad (9.18)$$

При использовании (9.18) в нее подставляются значения $P(X=i)$ с соответствующим законом распределения X согласно (9.13)—(9.15).

При методе последовательного анализа объем выборки заранее не устанавливается. Из контролируемой совокупности РТС последовательно, но случайным образом, берутся выборки произвольных объемов и в каждой выборке определяется количество образцов с неудовлетворительным состоянием.

Предварительно перед испытаниями составляются графики зависимости числа минимума и максимума образцов с неудовлетворительным состоянием от величины объема взятых выборок. Такой график изображен на рис. 9.3.

На график нанесены опытные данные, отмеченные на рисунке точками. Как только траектория этих точек выйдет из зоны продолжения испытаний, контроль РТС заканчивается и прини-

мается соответствующее решение о результатах контроля. На рис. 9.3 показан пример, когда контроль заканчивается с принятием положительного решения о результате контроля.

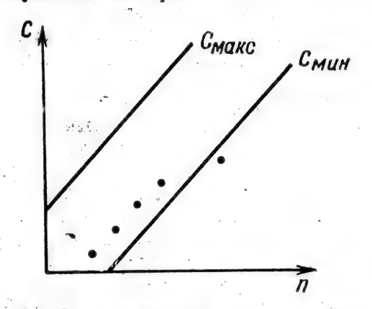


Рис. 9.3. Зависимость числа минимума и максимума неисправных образцов от величины объема выборки.

Метод последовательного анализа позволяет значительно сократить средний объем контролируемых образцов. Однако при этом методе трудно планировать требуемый объем работ при данной проверке, так как заранее неизвестно количество образцов, которое предстоит контролировать. Поэтому иногда применяется усеченный последовательный анализ, при котором контроль сначала ведут по методу последовательного анализа. Если он закончился при $n_1+n_2+\ldots+n_i=n_0$, то результаты контроля оцениваются методом однократной выборки.

Расчетные формулы для определения значений n и C, методику построения графиков зависимости минимума и максимума образцов с неудовлетворительным состоянием от величины объема выборок можно найти в [33].

Пример 9.3. Определить объем выборки при одноступенчатом контроле с использованием распределения Пуассона.

Рассмотрим случай $C=0$, т. е. в выборке не допускаются образцы с неудовлетворительным состоянием. Такое условие ставится при контроле организаций, к которым предъявляют повышенные требования. В этом случае (9.17) примет вид

$$\exp(-\psi_1 n)=1-\alpha,$$

$$\exp(-\psi_2 n)=\beta.$$

Решение. Задаваясь величинами α и ψ_1, находим значения n из таблицы [33].

ψ_1	α					
	0,001	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3
10^{-5}	100	1 005	5 129	10 536	22 314	35 667
10^{-4}	10	100	513	1 054	2 231	3 567
10^{-3}	1	10	51	105	223	357
10^{-2}	—	1	5	10	22	36
0,1	—	—	—	1	2	4

ψ_2	β					
	0,001	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3
10^{-5}	690 000	460 000	300 000	230 000	160 000	120 000
10^{-4}	69 000	46 000	30 000	23 000	16 000	12 000
10^{-3}	6 900	4 600	3 000	2 300	1600	1 200
10^{-2}	691	461	300	230	160	120
0,1	69	46	30	23	16	12

Пример 9.4. Задан одноступенчатый контроль с использованием распределения Пуассона. При этом $\psi_1=0{,}01$, $\psi_2=0{,}02$, $\alpha=0{,}05$ и $\beta=0{,}1$. Определить значения n и C.

Решение. По таблицам, приведенным в [33], в которых даются численные решения уравнений (9.17), находим $C=18$ и $n=1200$.

Глава 10

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ И РЕМОНТНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

10.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ВИДЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДОКУМЕНТОВ

Ответственность задач, решаемых РТС, сложность их обслуживания и постоянная модернизация предъявляют высокие требования к эксплуатационной документации, поставляемой промышленностью в эксплуатирующие аппаратуру организации.

Поддержание РТС в готовности к применению и правильная их эксплуатация зависят от четких знаний и безусловного выполнения

требований эксплуатационной документации обслуживающим персоналом[1].

Эксплуатационные документы РТС предназначены для использования их обслуживающим персоналом при эксплуатации с целью изучения устройства, технических возможностей, принципов действия, правил эксплуатации, технического обслуживания, транспортировки и хранения, а также учета технического состояния и статистических данных об отказах аппаратуры.

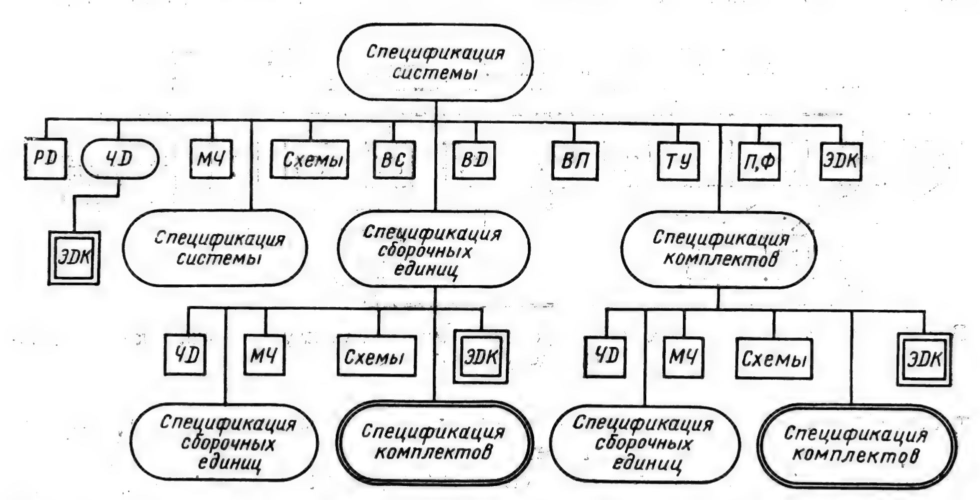


Рис. 10.1. Функциональная схема построения полного комплекта конструкторской документации аппаратуры РТС.

Эксплуатационные документы подразделяются на две группы: эксплуатационные конструкторские документы (ЭДК) и эксплуатационные документы эксплуатирующих организаций (ЭДО).

Документы первой группы определяют технические правила эксплуатации РТС. Они являются частью основного комплекта рабочей конструкторской документации (рис. 10.1), который обычно состоит из чертежей деталей (ЧД), монтажного чертежа (МЧ), ведомостей ссылочных документов (ВД) и покупных изделий (ВП), технических условий (ТУ), паспорта или формуляра (ПФ). На рис. 10.1 показана схема построения эксплуатационной конструкторской (ЭДК) и ремонтной (РД) документации (основные конструкторские документы показаны овалом; документы основного комплекта конструкторских документов — прямоугольником; документы, разрабатываемые для изделий, предназначенных для самостоятельной поставки, обведены двойной линией). ЭДК разрабатываются проектирующими организациями и их копии поставляются эксплуатирующим организациям совместно с аппаратурой.

Правила выполнения конструкторских документов приведены в ГОСТ 2.101—68 ... 2.106—68, 2.108—68 и 2.109—73, а эксплуатационных документов — в ГОСТ 2.601—68, 2.603—68 и 2.605—68.

ЭДК оформляются на аппаратуру серийного или массового производства, а также на аппаратуру опытной серии. Для опытных образцов

[1] Подробные сведения об эксплуатационных и ремонтных документах приведены в [35]. В данной главе приводятся только основные сведения о документах.

и для РТС индивидуального производства в качестве ЭДК или в их составе могут быть использованы проектные или рабочие конструкторские документы, применяемые для изготовления аппаратуры.

ЭДК составляются на РТС и их составные части, не составляются на части РТС, для которых объем сведений незначителен. Необходимые сведения о них наносятся на самих изделиях путем маркировки.

В комплект ЭДК входят следующие документы (рис. 10.2) [31]:

— техническое описание (ТО), инструкция по эксплуатации (ИЭ), инструкция по техническому обслуживанию (ИО), инструкция по монтажу, пуску, регулировке и обкатке на месте применения (ИМ), формуляр (ФО), паспорт (ПС), этикетка (ЭТ), ведомость ЗИП (ЗИ), ведомость эксплуатационных конструкторских документов (ЭД), руководство по эксплуатации (РЭ) и прочие документы (Д).

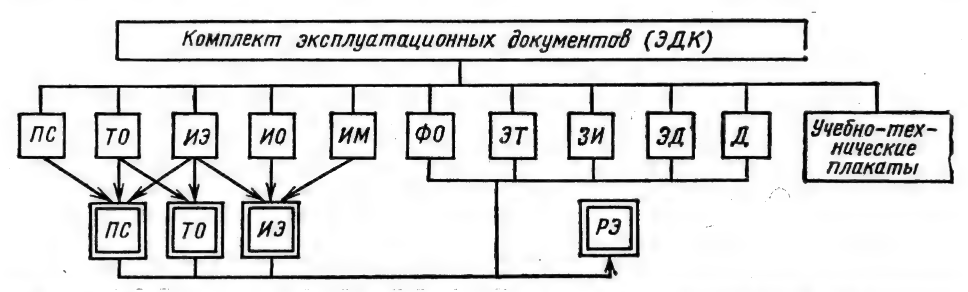


Рис. 10.2. Функциональная схема построения комплекта эксплуатационных конструкторских документов РТС.

Номенклатура ЭДК на конкретную РТС или ее часть, предназначенную для самостоятельной поставки, согласовывается с заказчиком аппаратуры.

Для удобства пользования сведения, необходимые для эксплуатации РТС, могут оформляться как один документ (двойной квадрат на рис. 10.2) под названием «Руководство по эксплуатации» (РЭ). «Техническое описание и инструкция по эксплуатации» (ТО), «Паспорт (ПС) или инструкция по эксплуатации» (ИЭ). РЭ составляется взамен всех эксплуатационных документов; ТО включает техническое описание и инструкцию по эксплуатации; ПС включает паспорт, техническое описание и инструкцию по эксплуатации; ИЭ включает сведения из инструкций по эксплуатации, техническому обслуживанию, монтажу и регулировке.

В объединенные документы вносятся данные, которые должен содержать каждый из объединяемых документов.

Ко второй группе относятся документы, определяющие правила использования РТС, обусловленные спецификой условий их применения эксплуатирующей организацией, а также документы учета наработок, повреждений и отказов. ЭДО разрабатываются специалистами эксплуатирующей организации и рассчитаны на обслуживающий персонал, прошедший специальную подготовку, изучивший устройство и правила использования РТС и способный эксплуатировать ее в соответствии с требованиями ЭДК.

В зависимости от сложности радиотехнического комплекса ЭДО можно разбить на подсистемы в виде отдельных самостоятельных документов. Кроме перечисленных ранее ЭДК, в дополнение к ним экс-

плуатирующими организациями могут составляться документы по текущему учету. Они играют роль черновиков и обеспечивают сохранность, а также аккуратность и правильность ведения основного комплекта ЭДК (паспортов, формуляров и др.) обслуживающим персоналом. Примерами такого рода документов являются [24, 25]: «Журнал учета работы радиосредства», «Расписание действия радиосредства», «Журнал технического осмотра и ремонта оборудования», «Журнал учета работы агрегата (аккумуляторной батареи)», «Журнал учета работы радиоламп», «Журнал обнаруженных технических неисправностей», «Журнал проверки знаний по Правилам техники безопасности», «Журнал инструктажа по Правилам техники безопасности» и т. п.

Объем и содержание эксплуатационных документов должны обеспечивать изучение конкретной РТС и включать все сведения, необходимые для правильной эксплуатации и полного использования ее технических возможностей. В них включают сведения о всех видах эксплуатации РТС: о порядке и сроках проведения технического обслуживания, о хранении, транспортировании всеми видами транспорта (автомобильным, железнодорожным, воздушным, водным), погрузке и разгрузке, сборке и разборке с применением одиночного и группового комплектов ЗИП, а также о всех других мероприятиях по обращению с аппаратурой с момента ее выпуска с завода-изготовителя.

Всем специалистам, занимающимся эксплуатацией РТС, нужно иметь четкое представление о назначении каждого документа, системе обозначений и правилах пользования документами.

Для сбора и обработки информации о надежности применяются специальные документы учета.

Требования к формам учета наработок, повреждений и отказов, применяемых при сборе и обработке информации о надежности РТС в условиях эксплуатации, приведены в ГОСТ 17626—72. Предусмотрены следующие виды форм учета:

— первичные формы учета эксплуатационной информации;

— формы-накопители эксплуатационной информации;

— формы записи результатов анализа.

Первичные формы учета предназначены для записи несистематизированной информации. Они заполняются на месте эксплуатации РТС. К основным из них относятся: журнал учета наработок повреждений и отказов РТС; журнал учета технического обслуживания и ремонта РТС; разовые документы эксплуатации РТС (путевой лист, карточка на ремонт, донесение об отказе РТС и т. п.). В этих формах должны содержаться обязательные сведения:

1) в журнале учета наработок, повреждений и отказов — паспортные данные об РТС; наименование эксплуатирующей организации; режимы работы и условия эксплуатации; дата, время включения и выключения; наименование поврежденного устройства (платы, блока, стойки); описание характера внешнего проявления и предполагаемой причины повреждения или отказа; время отыскания и устранения, а также способ устранения повреждения или отказа;

2) в журнале учета технического обслуживания и ремонта — паспортные данные об РТС; наименование эксплуатирующей организации; наименование поврежденного устройства; дата, время проведения и вид технического обслуживания или ремонта; способ устранения повреждения или отказа; продолжительность и стоимость (с учетом стоимости замененных устройств) технического обслуживания или ремонта.

Разовые документы эксплуатации РТС в совокупности должны содержать информацию, позволяющую заполнять формы-накопители и формы записи результатов анализа.

Формы-накопители необходимы для записи систематизированной по определенным признакам информации. Они заполняются по данным первичных документов или в процессе наблюдения за эксплуатацией РТС специально обученным персоналом. К основным формам-накопителям информации относятся: карта-накопитель наработок, повреждений и отказов РТС (или ее части), а также карта-накопитель сведений

о техническом обслуживании и ремонте. Эти формы должны содержать следующие обязательные сведения: 1) в карте-накопителе наработок, повреждений и отказов — паспортные данные о РТС; наименование эксплуатирующей организации; режимы работы и условия эксплуатации РТС; дата выявления повреждения или отказа; наименование сборочной единицы (детали); наработка до каждого отказа; описание характера, внешнего проявления и предполагаемой причины повреждения или отказа; 2) в карте-накопителе сведений о техническом обслуживании и ремонте РТС — паспортные данные; наименование обслуживающей организации; наименование поврежденной сборочной единицы (элемента схемы или детали); вид технического обслуживания или ремонта; продолжительность и трудоемкость технического обслуживания или ремонта; причина повреждения или отказа; стоимость технического обслуживания (ремонта) с учетом стоимости использованных запасных материалов.

Формы записи результатов анализа надежности используют для учета данных о количественных или качественных результатах анализа надежности РТС и ее составных частей (о режимах работы; фактическом расходе запасных частей; причинах отказов; номенклатуре деталей, элементов и сборочных единиц, лимитирующих надежность РТС). К основным из них относятся: сводные перечни (оценок показателей надежности РТС и ее составных частей; видов повреждений и отказов РТС) и сводные ведомости (расхода запасных частей; трудоемкости и стоимости технического обслуживания и ремонта). В формы записи результатов анализа надежности вносят следующие сведения: 1) в сводный перечень показателей надежности РТС или ее части — паспортные данные; показатели надежности (безотказность, долговечность, сохраняемость, ремонтопригодность); оценки показателей надежности; режимы работы и условия эксплуатации, применительно к которым производилась оценка надежности; 2) в сводный перечень видов повреждений и отказов РТС — паспортные данные; перечень повреждений и отказов, выявленных в процессе эксплуатации; причина повреждений и отказов; количество повреждений и отказов конкретного вида; средняя наработка до повреждения, отказа; 3) в сводную ведомость расхода запасных частей РТС — паспортные данные о РТС; перечень заменяемых частей; количество произведенных замен за время наблюдения; стоимость замененных частей и ремонта (включая стоимость элементов и работ по замене); 4) в сводную ведомость трудоемкости и стоимости технического обслуживания и ремонта РТС — паспортные данные о РТС; вид, трудоемкость и стоимость (с учетом стоимости замененных частей и работ по замене) технического обслуживания или ремонта.

Для безошибочного заполнения форм учета к ним прилагаются инструкции по заполнению, которые разрабатываются организациями, обеспечивающими сбор и обработку информации о надежности. Инструкции являются самостоятельными документами. Они согласовываются с методическими материалами по сбору информации, разрабатываемыми головными организациями по данному типу РТС в соответствии с ГОСТ 18468—70. В инструкциях излагаются сведения, необходимые для правильного внесения результатов, полученных из эксплуатационных наблюдений.

10.2. СОДЕРЖАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КОНСТРУКТОРСКИХ ДОКУМЕНТОВ [35]

Техническое описание (ТО) предназначено для изучения устройства и принципов действия РТС и ее составных частей. Оно содержит описание устройства и принципов действия системы и ее составных частей, а также технические характеристики и другие сведения, необходимые для более полного использования ее технических возможностей. Объем сведений, приведенных в ТО, должен обеспечивать правильную эксплуатацию РТС и всех ее модификаций, если для них не составлены самостоятельные ТО. Подробное описание стандартизованных и наиболее распространенных приборов, инструмента и принадлежностей и других изделий, входящих в состав РТС, в ТО не приводится с целью сокращения его объема.

В инструкции по эксплуатации (ИЭ) излагаются сведения, необходимые для правильной эксплуатации, использования, транспортирования, хранения и технического обслуживания РТС и поддержания ее в постоянной готовности к действию на весь пориод эксплуатации, начиная с момента отправки РТС с предприятия-изготовителя.

В инструкции по техническому обслуживанию (ИО) излагаются порядок

и правила технического обслуживания для различных условий эксплуатации РТС: при подготовке к работе, хранению, транспортированию и перемещению своим ходом; работающих в данное время по прямому назначению, находящихся на кратковременном и длительном хранении, транспортируемых или перемещающихся своим ходом; после использования — работы, транспортирования и перемещения своим ходом.

Изложение отдельных рекомендаций, правил и положений может даваться в виде таблиц. Так, при изложении порядка технического обслуживания обычно даются перечни основных проверок технического состояния РТС; наиболее часто встречающихся или возможных неисправностей; специальных приборов, оборудования, стендов и инструмента; стандартизованного оборудования, приборов, стендов и приспособлений. Перечень работ для различных видов технического обслуживания рекомендуется приводить в виде табл. П1.1 — П1.5 (см. приложение 1). Таблицы П1.6 и П1.7 рекомендуются для изложения сведений о техническом освидетельствовании.

В зависимости от вида и организации работ по техническому обслуживанию РТС могут составляться отдельные инструкции, охватывающие содержание одного или нескольких разделов ИО или отдельные виды работ. Кроме того, ИО может выпускаться под названием «Регламент (единый регламент) технического обслуживания» или «Технология выполнения регламентных работ».

Инструкция по монтажу, пуску, регулировке и обкатке РТС на месте ее применения (ИМ) содержит сведения, необходимые для технически правильного проведения монтажа, пуска, регулировки и обкатки, а также демонтажа аппаратуры.

Формуляр (ФО) является документом, удостоверяющим гарантированные предприятием-изготовителем основные параметры и характеристики РТС, а также отражающим ее техническое состояние на любом отрезке времени эксплуатации. Он содержит сведения по эксплуатации РТС (длительности и условия работы, техническое обслуживание, виды ремонта и другие данные) за весь период эксплуатации. Содержание разделов ФО оформляется в виде таблицы. В табл. П1.8—П1.26 приведены рекомендуемые стандартами формы для заполнения разделов ФО.

Для сложных РТС дополнительно к формуляру эксплуатирующей организацией могут оформляться приложения, например, «Аппаратный журнал» [34]. Итоговые данные из них периодически переносятся в ФО. Введение приложений позволяет улучшить правильность и аккуратность ведения основного учетного эксплуатационного документа РТС.

Паспорт (ПС) — документ, удостоверяющий гарантированные предприятием-изготовителем основные параметры и характеристики РТС. Содержание и изложение разделов в нем должно соответствовать содержанию и изложению соответствующих разделов ФО. ПС составляется на небольшие и несложные системы и, как правило, на общепромышленные устройства широкого применения. Этикетка (ЭТ) предназначена для изложения в ней основных показателей и сведений об РТС или ее частях.

К вспомогательным (прочим) эксплуатационным конструкторским документам относятся: памятка по обращению с изделием; инструкции для отдельных специалистов обслуживающего персонала; инструкции по технике безопасности (по защите от высокочастотных излучений и т. п.); инструкции по проверке специальных контрольно-измерительных приборов и специального вспомогательного оборудования; инструкции по проведению различных специальных работ, проверок и испытаний РТС на промежуточных пунктах, базах и складах; специальные формуляры; ведомости различного содержания; нормативные документы; каталоги чертежей, схем и другие; перечни контрольно-проверочной и измерительной аппаратуры; спецификации.

Учебно-технические плакаты предназначены для изучения конкретной темы (устройства конструкций, принципов действия отдельных устройств, приемов использования и технического обслуживания, технологических процессов и областей технических знаний).

По каждой теме в зависимости от сложности и объема выпускается отдельная серия плакатов или один плакат в многокрасочном исполнении в соответствии с правилами, изложенными в ГОСТ 2.605—68.

10.3. НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ВЕДЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДОКУМЕНТОВ

Обслуживающий персонал РТС обязан систематически, в установленные сроки, правильно и аккуратно вести записи в эксплуатационных документах. Наиболее ответственно ведение формуляров и паспор-

тов, так как они являются единственными документами, удостоверяющими текущее состояние аппаратуры. Формуляры на аппаратуру ведутся ответственными лицами, за которыми она закреплена. При полугодовом и годовом техническом обслуживании, а также в случае отправки РТС из эксплуатирующей организации в формуляр заносятся итоговые сведения из аппаратного журнала. Сведения о проведенном ремонте, замене узлов и деталей с израсходованными техническими ресурсами заносятся в формуляр немедленно.

Внесение изменений в копии ЭДК производится на основании «Бюллетеней эксплуатационных» (БЭ) предприятий — держателей подлинников, а также на основании директивных распоряжений заказчика аппаратуры с последующим выпуском БЭ в соответствии с ГОСТ 2.603—68. БЭ выпускаются и передаются эксплуатирующей организации один раз в год в соответствии с действующим стандартом, а при срочных изменениях — немедленно, с указанием на титульном листе «Внимание! Изменения внести немедленно!».

Изменения в ЭДК вносятся в следующих случаях [35]:

— при изменениях конструкции или схемы РТС или условий эксплуатации, которые вызывают необходимость изменения установленных ранее правил эксплуатации;

— при изменении способов и техники ремонта РТС, которые влекут за собой изменение технологии ремонта и технических требований, предусмотренных ранее выпущенными эксплуатационными и ремонтными документами;

— при обнаружении в документе ошибки, вызывающей неправильную эксплуатацию или ремонт РТС.

Новые документы с изменением обозначений выпускаются, если после внесения изменений в копии ЭДК нарушится конструкция и взаимозаменяемость узлов РТС узлами, изготовленными ранее.

Дополнение к документам и переиздание их с сохранением обозначений применяется при большом числе изменений, которые могут создать затруднение при пользовании измененными документами. Порядок внесения изменений в ЭДО определяется правилами, установленными эксплуатирующей организацией.

Качественная эксплуатационная документация — важнейшее условие правильной организации эксплуатации РТС обслуживающим персоналом и, следовательно, соблюдения режимов, заложенных при ее проектировании.

Эксплуатационная документация должна разрабатываться так же тщательно, как и сама аппаратура. Нельзя рассчитывать на то, что недостатки в составлении документации будут компенсированы подготовкой обслуживающего персонала. ЭДК и ЭДО должны полностью обеспечить изучение обслуживающим персоналом устройства РТС и проведение на ней всех видов работ при эксплуатации в различных условиях. В составлении эксплуатационной документации еще встречаются недостатки, наиболее характерные из них могут быть следующие [34]:

— поверхностное описание общих принципов функционирования РТС и взаимосвязей отдельных функциональных частей;

— подробное описание простых и краткое описание трудопредставляемых процессов;

— формальное описание конструкции, а также органов управления;

— недостаточное изложение взаимосвязей органов управления с электрическими принципиальными схемами;

— использование графических документов, предназначенных для производства аппаратуры и малопригодных для ее эксплуатации;

— составление графических документов больших форматов, неудобных для использования в условиях ограниченного места;

— отсутствие в документах перечня литературы по общим вопросам и физическим процессам, протекающим в аппаратуре, и др.

10.4. НАЗНАЧЕНИЕ И ВИДЫ РЕМОНТНЫХ ДОКУМЕНТОВ [35]

Ремонтные документы предназначены для использования персоналом, обслуживающим РТС, или персоналом ремонтного органа при подготовке ремонтного производства, ремонте и контроле РТС после ремонта. Они определяют технические правила ремонта, а также требования, предъявляемые к РТС после ремонта.

Ремонтные документы являются рабочими конструкторскими документами и разрабатываются организациями — разработчиками РТС в случаях, когда предусматривается технически возможное и экономически целесообразное восстановление технических параметров и характеристик, изменяющихся при эксплуатации и определяющих возможность использования РТС по прямому назначению.

Ремонтные документы разрабатываются, как правило, для систем серийного и массового производства на каждый вид ремонта: текущий, средний и капитальный. На текущий ремонт ремонтные документы выпускаются при необходимости. При отсутствии документов на текущий ремонт он проводится по эксплуатационным конструкторским документам, в которых в этом случае должны приводиться необходимые указания о ремонте.

В зависимости от степени отработки и проверки в ремонтном производстве ремонтные документы относятся к одному из трех видов: документы опытного ремонта, документы установившегося серийного или массового ремонтного производства, документы установочной ремонтной серии.

Документы опытного ремонта (РО) предназначены для ремонта заранее установленной партии РТС или для ремонта РТС в течение определенного срока. Они должны быть проверены при опытном ремонте одной или нескольких РТС.

Документы установочной ремонтной серии (РА) предназначены для ремонта последующий партий РТС или для организации серийного массового ремонтного производства. Они разрабатываются на основе документов опытного ремонта и испытаний определенной партии установочной серии РТС.

Документы установившегося серийного или массового производства (РБ) предназначены для использования при установившемся ремонтном производстве. Это окончательно отработанные и проверенные в ремонтном производстве документы по утвержденному и полностью оснащенному ремонтному процессу.

В зависимости от назначения ремонтные документы разделяются на следующие виды: руководства по ремонту; технические условия на ремонт; нормы расхода запасных частей; нормы расхода материалов; ведомость ремонтных документов; каталоги деталей и сборочных единиц; чертежи ремонтные и схемы; прочие документы.

Первые пять видов документов являются обязательными для среднего и капитального ремонтов РТС установочных серий и массового ремонтного производства. Из двух документов руководство по ремонту и технические условия на ремонт разрабатывается только один.

Для обеспечения технически грамотного ремонта в комплект документов для обеспечения ремонта РТС, кроме ремонтных документов, входят: эксплуатационные конструкторские документы; комплект рабочей документации для среднего и капитального ремонтов; конструкторские документы на нестандартизованное специальное оборудование, специальные стенды, приспособления и инструмент; учебно-технические плакаты.

10.5. СОДЕРЖАНИЕ РЕМОНТНЫХ ДОКУМЕНТОВ [35]

Следует различать общее руководство по ремонту и руководство по ремонту.

Общее руководство по ремонту является ремонтным документом, требования которого распространяются на все РТС определенного класса, подкласса или группы (например, радиолокационные РТС, телеметрические РТС и т. п.).

Общее руководство по ремонту составляется раздельно для среднего (СО) и капитального (КО) ремонтов в случаях, когда общие указания по организации и технологии ремонта, а также общие технические требования к ремонту РТС данного класса (подкласса и группы) целесообразно изложить в отдельном документе, исключив эти сведения из руководств по ремонту РТС конкретного наименования.

Руководство по текущему (среднему) ремонту и руководство по капитальному ремонту разрабатывается для РТС конкретного наименования. Оно составляется в случаях технической возможности и экономической целесообразности проведения соответствующего вида ремонта.

Различают два вида технических условий: общие технические условия и технические условия.

Общие технические условия (ТУ) являются общим ремонтным документом, требования которого распространяются на все изделия данного класса, подкласса или группы. Они составляются отдельно на средний (ОС) и капитальный (ОК) ремонты или в виде одного документа на оба вида ремонта (УО), в тех случаях, когда составляется общее руководство по ремонту.

В общих ТУ приводятся общие технические требования, показатели, нормы, которым должны удовлетворять все отремонтированные РТС данного класса, подкласса и группы.

Их построение, как правило, должно соответствовать построению общего руководства по ремонту. В общие ТУ не включаются показатели, относящиеся к организации производства и технологическому процессу ремонта РТС.

Технические условия на капитальный (УК) или средний (УС) ремонты, капитальный и средний (УР) являются документом, требования которого распространяются на ремонт РТС конкретного наименования. Они содержат только специальные требования, относящиеся к ремонту конкретных РТС и используются одновременно с общим ТУ.

Технические условия по своему содержанию аналогичны разделам соответствующих руководств по ремонту РТС и ее частей. При выпуске ТУ на ремонт руководства по ремонту на тот же вид ремонта не выпускаются.

Ремонтный документ «Нормы расхода запасных частей» для среднего (ЗС) или капитального (ЗК) ремонтов составляется в виде ведомости, содержащей нормы расхода запасных частей на один ремонт одной, десяти или ста РТС, и оформляется раздельно на средний и капитальный ремонты. Он предназначен для составления заявок на запасные части при планировании и организации ремонта.

Ремонтный документ «Нормы расхода материалов» для среднего (МС) или капитального (МК) ремонтов составляется также в виде ведомости, содержащей нормы расхода материалов на один ремонт одной, десяти или ста РТС. Он предназначен для составления заявок на материалы при планировании и подготовке ремонтного производства.

Ведомость документов для ремонта (ВР) устанавливает комплект конструкторских документов, необходимых для выполнения ремонта РТС. Она составляется, когда для ремонта используется более одного документа.

Каталог деталей и сборочных единиц (КД) предназначен для составления заявок на запасные части, необходимые при эксплуатации и ремонте РТС.

Ремонтные чертежи и схемы разрабатываются, когда ремонт заменой на основе взаимозаменяемости изношенных или вышедших из строя составных частей новыми исправными технически невозможен или экономически нецелесообразен.

В зависимости от характера РТС и видов ее ремонта могут составляться и другие документы (прочие).

В зависимости от особенностей РТС как объекта ремонта отдельные разделы рассмотренных ремонтных документов можно объединить или ввести новые разделы. Отдельные разделы руководств по ремонту могут быть изданы в виде отдельных документов. В этом случае содержание этих разделов в документ не включается, но дается ссылка на самостоятельный документ.

10.6. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РЕМОНТНЫМ ДОКУМЕНТАМ [35]

Ремонтные документы составляются на систему в целом независимо от наличия ремонтных документов на составные части. Если указания о ремонте изложены в ремонтных документах на составные части, то ремонтные документы на всю РТС могут не составляться. При этом в ремонтных документах на основную составную часть РТС приводятся ссылки на ремонтные документы остальных составных частей.

Ремонтные документы должны разрабатываться на основе рабочей конструкторской, эксплуатационной конструкторской и технологической документации; анализа ремонтопригодности РТС в целом и ее составных частей, а также материалов по анализу неисправностей; результатов научно-исследовательских работ по исследованию технологических процессов ремонта; материалов опытного износа и ремонта РТС; опыта по ремонту аналогичных систем; анализа продолжительности гарантийных сроков эксплуатации.

Ремонтные документы разрабатывают в соответствии с предполагаемым объемом ремонтного производства (единичный, серийный или массовый ремонт), с учетом экономической целесообразности и технических возможностей группы ремонтных предприятий или эксплуатирующей организации, для которых они предназначаются.

Ремонтные документы составляют на основе последних действующих рабочих чертежей и схем с учетом чертежей и схем предыдущих стадий отработки, по которым было изготовлено сравнительно большое количество РТС. В них должна приводиться максимально возможная номенклатура восстанавливаемых при ремонте составных частей РТС. При разработке ремонтных документов необходимо сохранять взаимозаменяемость деталей и составных частей, предусмотренную в конструкторской документации, и подобрать такие способы ремонта, которые позволили бы в максимальной степени восстанавливать параметры деталей и других составных частей, а также характеристики РТС до первоначальных.

Способы ремонта, технические требования к отремонтированной РТС, параметры, определяющие эксплуатационные характеристики аппаратуры после ремонта, нормы расхода запасных частей и материалов и другие показатели, включаемые в ремонтные документы, необходимо технически обосновать и экспериментально проверить.

Параметры РТС, приведенные в ремонтных документах с отклонением от требований конструкторской документации, не должны ухудшать ее эксплуатационно-технические характеристики.

Техническое состояние деталей и других составных частей РТС, допущенных к дальнейшей эксплуатации без ремонта, должно обеспечивать надежную работу отремонтированной РТС до очередного планового ремонта.

В ремонтных документах обязательно предусматриваются возможно бо́льшие запасы на регулирование составных частей РТС, если оно необходимо при эксплуатации и предусмотрено в эксплуатационных документах.

По согласованию с заказчиком или в соответствии с техническим заданием на ремонт в ремонтные документы включают следующие сведения:

— правила и указания по устранению аварийных повреждений, а также способы ремонта, обеспечивающие быстрое восстановление основных эксплуатационных характеристик РТС, но допускающие ее эксплуатацию только на ограниченный срок;

— перечень неисправностей, с которыми РТС может допускаться к эксплуатации на ограниченный срок;

— программы и методики ускоренных испытаний для определения возможности кратковременной эксплуатации РТС с неисправностями и повреждениями.

Ремонтные работы в документах перечисляются в технологической последовательности их выполнения. При этом указываются: методы или способы выполнения работы; виды оборудования, инструмент, стенды, приборы, необходимые для ремонта; технические требования, которым должна отвечать отремонтированная РТС или ее части.

В ремонтных документах необходимо указывать операции, выполнение которых связано с повышенными требованиями безопасности, и указывать меры предупреждения повреждений РТС. При необходимости они иллюстрируются. В ремонтной документации допускается делать ссылки только на документы, которые включены в ведомость документов для ремонта данной РТС.

Ремонтные документы рассчитаны на соответствующую квалификацию исполнителей ремонтных работ, прошедших специальную подготовку по технически правильному выполнению ремонта РТС.

Ремонтные документы с тиражом более ста экземпляров для серийного и массового ремонтного производства необходимо издавать типографским способом.

Глава 11

ЗНАЧЕНИЕ ЭРГОНОМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧЕЛОВЕКА В РЕШЕНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАДАЧ

11.1. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ПСИХОЛОГИИ

В последние годы все более широко проявляется растущее противоречие между сложностью и ответственностью задач, возлагаемых на технические средства и устройства, и возможностями человека, обслуживающего эти средства, управляющего ими или принимающего решения на основе информации, отображаемой с их помощью.

Современные РТС требуют для своей эксплуатации квалифицированный технический персонал, качество подготовки которого оказывает существенное влияние на надежность и эффективность применения техники по своему целевому назначению. Как показывают статистиче-

ские данные, в среднем до 40% срывов применения РЭА происходит по вине операторов. Анализ срывов показывает, что ошибки возникают не только из-за нарушения требований эксплуатационно-технической документации системы, но и в результате того, что в конструкции системы не всегда учтены эргономические свойства человека.

Понятие эргономических свойств человека исходит из основных положений эргономики — науки, занимающейся исследованием «человеческого фактора» в производственной и бытовой деятельности «человека-оператора», «человека-потребителя». Научной основой эргономики является комплексный, системный подход к изучению систем «человек — изделие», «человек — изделие — среда», имеющий гигиенический, антропометрический, физиологический, психофизиологический и инженерно-психологический аспекты. К эргономическим свойствам, в частности, относятся силовые и скоростные возможности человека, показатели его анализаторов (слуха, зрения, осязания), скорость реакции и т. д. Оценка надежности и эффективности системы в целом должна учитывать не только их функционирование, но и работу обслуживающего персонала, эксплуатирующего системы [9, 10, 16, 26, 34].

Быстрое развитие техники в наши дни изменяет условия режимов ее эксплуатации человеком. Основным содержанием процесса эксплуатации становится сложный комплекс умственной деятельности по управлению системами с элементами физической работы.

Указанные обстоятельства привели к возникновению проблемы «человек — техника». Разрешение этой проблемы и является предметом эргономики — системотехнической дисциплины, изучающей методы согласования возможностей человека и технических систем, а также методы повышения эффективности работы операторов в комплексных системах «человек — техника».

Система «человек — техника» может представлять различное по объему объединение обслуживающего персонала и техники, которое работает как одно целое для решения единой поставленной задачи. Такое объединение может быть большой совокупностью, состоящей из нескольких РТС и целого подразделения обслуживающего персонала. Оно может состоять из одного человека и одного технического устройства, например, оператор и обслуживаемая РТС. Поэтому понятие системы «человек — техника» в этом смысле является условным и зависит от цели, для которой она создана, и от выполняемой ею работы. Однако следует иметь в виду, что малая система почти неизменно является частью большой системы и что работа каждой из них зависит от качества функционирования другой.

В современной эргономике можно выделить три основных направления исследований:

— изучение психофизиологических характеристик человека и его возможностей по управлению техническими системами;

— исследование и разработка методов согласования психофизиологических характеристик и возможностей человека с техническими характеристиками различных систем с целью объединения в единую систему «человек — техника»;

— изучение динамики работы операторов на технических системах и разработка оптимальных режимов эксплуатации с целью повышения надежности функционирования системы «человек — техника» в целом.

Результаты первых двух направлений в основном используются на этапе разработки и проектирования РТС. Если при проектировании РТС не были учтены психофизические характеристики обслуживающего персонала, то при эксплуатации для поддержания требуемой эффективности системы потребуется их компенсация в виде больших затрат на профессиональный отбор и на специальную техническую подготовку операторов для работы с такими системами.

Результаты работ первого и третьего направления находят бóльшее применение при эксплуатации РТС, когда на их основе разрабатываются методы повышения эффективности применения системы по ее целевому назначению.

Для оценки вклада оператора как одной из компонент системы «человек—техника» необходимо ясно представлять себе возможности человека и ограничения, вызываемые включением его в такую систему. Поэтому в инженерной психологии характерно рассмотрение человека-оператора в виде специфического звена системы управления, имеющего сенсорные (чувствующие)

входы и моторные (двигательные) выходы.

При взаимодействии человека с окружающей средой получение информации от внешнего мира осуществляется, как известно, с помощью пяти органов чувств: зрения, слуха, осязания, обоняния и вкуса.

Для получения информации от радиотехнических средств в настоящее

— реализация принятых решений в виде двигательных актов (работа) или словесных сигналов (речь).

Основными характеристиками, определяющими качество протекания этих процессов, является чувствительность и разрешающая способность анализаторов, длительность процессов восприятия и мышления, точность и надежность выполнения операции и т. д. Значения

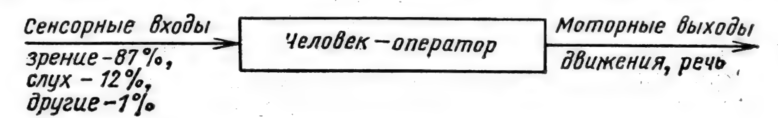


Рис. 11.1. Распределение информации по сенсорным входам.

время из органов чувств используются преимущественно зрение и слух. При этом 87% информации, получаемой по сенсорным входам, приходится на долю зрения (рис. 11.1). Объясняется это тем, что характер и физическая природа контролируемых параметров систем таковы, что удобнее всего осуществить визуальную передачу информации путем показаний различных приборов, записей регистрирующих устройств, а также световых индикаторов.

При акустическом способе приема информации можно обеспечить такое различие по тональности и мощности между теми или иными сигнализаторами, что практически возможно исключить вероятность неправильного приема. Следует иметь в виду, что речевой сигнал является весьма важным, а иногда единственным способом передачи информации в системе «человек — техника».

Количество пропусков и ошибок
Сенсорный голод
Нормальная работа
Перегрузка
40
400
4000
сигналов/ч

Рис. 11.2. Зависимость числа ошибок оператора от его загрузки информацией.

В основе взаимодействия человека и техники лежат:

— ощущения (прием информации);

— восприятия (прием и частичная обработка информации);

— мышление (обработка информации и принятие решений);

этих характеристик зависят от индивидуальных особенностей человека, степени его утомления, свойств и качеств источников информации и других факторов.

Важной особенностью человека является то, что оптимальная переработка поступающей к нему информации происходит в том случае, когда она по объему согласована с его характеристиками и не является достаточно малой или слишком большой по количеству принимаемых сигналов. При большой загрузке информацией операторы не успевают выполнять заданные функции, но когда за счет автоматизации нагрузка сильно уменьшается, то у них теряется активность.

Как показывают исследования, наибольшая работоспособность у оператора проявляется в случае поступления к нему 400 сигналов в час, на которые он должен реагировать. Когда количество поступающих сигналов уменьшается на порядок, то оператор теряет активность из-за малой загрузки. В этом случае он пропускает больше сигналов, чем при оптимальной загрузке. Аналогичное положение наступает и при перегрузке (рис. 11.2).

В настоящее время до конца еще не разработаны методы оценки пропускной способности анализаторов человека с использованием теоретико-информационных мер. Поэтому максимальная пропускная способность зрительного анализатора при приеме элементарной информации (буквы, цифры, простые геометрические фигуры) оценивается в среднем на уровне 50...70 бит, а при переработке информации она падает до 4 бит. Естественно, пропускная способность уменьшается, когда информация предъявляется неоптимальным образом.

Следует иметь в виду, что прием информации не всегда сопровождается

ее немедленной переработкой и передачей. Какая-то часть информации неизбежно запечатлевается в памяти человека и может по мере необходимости «извлекаться» практически в любой момент времени. По мнению многих авторов [9, 10, 16], способность человека к накоплению информации по объему исчисляется от $15 \cdot 10^6$ до 10^{21} бит (по различным источникам).

Однако общий объем памяти не может полностью характеризовать качество механизмов сохранения информации, и поэтому вводят понятие долговременной и оперативной памяти. Вышеприведенные цифры характеризуют объем долговременной памяти.

Оперативная память представляет собой способность человека сохранять оперативную информацию в течение коротких промежутков времени, определяемых длительностью процессов обслуживания системы. Объем ее изменяется в очень широких пределах в зависимости от количества информации, приходящегося на каждый запоминаемый символ, отсчет или запоминаемый объем состояния приборов и индикаторов пульта управления, а также системы в целом. Важнейшей способностью человека, принимающего информацию, является способность к интерполяции и коррекции ошибок.

В том случае, когда информация предъявляется не в цифровом виде и не в виде показаний стрелочных приборов, а, например, на экране осциллографа в виде плавных сигналов, человек при считывании может допускать сравнительно большие ошибки. Это обстоятельство необходимо учитывать, поскольку ошибки операторов складываются с ошибками технических средств, уменьшая приборную точность таких средств.

Важным разделом исследования психофизиологических характеристик человека является изучение специфики принятия решений в процессе его операторской деятельности. Установлено, что человек очень редко действует по-машинному, используя метод последовательного перебора ситуаций или метод проб и ошибок. В процессе мышления оператор формирует в своем сознании модель управляемого объекта на основе знаний и получаемых сведений о динамике этого объекта. Эта модель сравнивается с течением процессов в реальном объекте. Перед принятием решения оператор мысленно как бы испытывает созданную модель, и если результаты такого испытания оказываются желательными, он принимает решение, испытанное на модели.

Знание того, как строит оператор в своем сознании модель управляемого объекта и его динамику, позволяет сформулировать требования к объему и скорости представления информации таким образом, чтобы они способствовали быстрому и правильному формированию модели объекта у оператора.

Рассмотрение вопросов системотехнического направления, связанного с исследованием и разработкой методов согласования характеристик человека с характеристиками техники, показывает, что распределение функций между оператором и системой сводится к тому, что человека и машину нельзя сравнивать — они дополняют друг друга. Наиболее рациональным подходом к решению этой задачи является комбинация достоинств как технических систем, так и операторов этих систем. На каждую из частей системы «человек — машина» следует возлагать те обязанности, которые она выполняет наилучшим образом.

При решении вопроса о распределении функций между человеком-оператором и техническими средствами приходится также использовать принцип естественности, заключающийся в том, что некоторые функции по принятию решения приходится возлагать на человека даже тогда, когда машина делает это быстрее. Такое положение обусловливается высокой ответственностью принимаемых решений о целевом применении системы и опасностью последствий на основе неправильных решений.

Важным моментом использования результатов исследований системотехнического направления является применение требований инженерной психологии при конструировании аппаратуры, пультов управления, органов управления и представления информации. Примеры таких решений, в частности, можно найти в [10, 16, 28].

11.2. РОЛЬ ОПЕРАТОРА В СЛОЖНОЙ СИСТЕМЕ «ЧЕЛОВЕК—ТЕХНИКА»

Важный объединяющий принцип построения системы «человек — техника» состоит в представлении оператора в виде одноканальной схемы переработки информации с ограниченной пропускной способностью.

При этом оператор рассматривается скорее как канал связи, а не как преобразователь или источник энергии. Действия оператора в си-

стеме «человек — техника» представляется возможным описать в терминах и символах теории автоматического регулирования, подвергнув его работу измерениям, определить его передаточную функцию так, как если бы на месте оператора было обычное динамическое звено системы регулирования.

Характерной особенностью системы «человек — техника» является то, что оператор решает поставленную целевую задачу, находясь с техникой в прямой функциональной связи, образуя замкнутый контур для потока информации. При этом следует отметить, что ни одна из составных частей системы «человек — техника» самостоятельно (отдельно друг от друга) не может осуществить решение целевой задачи,

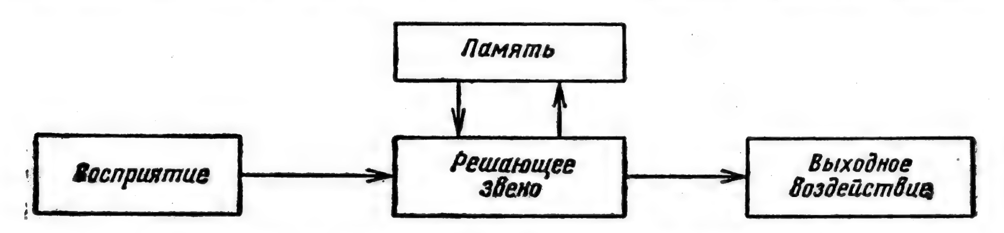


Рис. 11.3. Структурная схема оператора как устройства переработки информации.

стоящей перед системой. Гипотеза одноканальности позволяет рассматривать деятельность оператора как ряд последовательно выполняемых действий.

Оператор как устройство переработки информации представляется в виде схемы, изображенной на рис. 11.3.

Несмотря на такое упрощенное представление, по существу весьма затруднительно изучать функционирование каждого звена, входящего в схему, так как эффективность его работы, с одной стороны, определяется максимальными возможностями организма для выполнения данной работы, а с другой, — уровнем эмоционально-волевого напряжения, который регулирует степень использования этих максимальных возможностей.

При рассмотрении показателей и характеристик органов чувств, определяющих эффективность восприятия оператором воздействий внешней среды, в основном используют понятия и методы, применяемые в теории обнаружения сигналов. Например, чувствительность обнаружения, порог обнаружения, понятия двух видов ошибок (ложная тревога и пропуск сигнала), дифференциальная чувствительность. Под дифференциальной чувствительностью понимают величину наименьшего различимого изменения некоторой физической характеристики сигнала или раздражителя.

Память позволяет оператору использовать результаты предыдущей деятельности в будущем при работе в системе. Без ее роли не может быть ни обучения, ни возможности адаптации к изменениям окружающей среды. Однако в рассматриваемой схеме она представляется в виде аналогии с буферной памятью ЭВМ. Информация в процессе ее поступления в известном смысле кодируется для более длительного хранения или для дальнейшей переработки. Большинство задач, решаемых оператором, требует какого-то вида кратковременной памяти. Способность использовать текущую информацию и предсказывать будущие состояния системы на основании предыдущих показаний во многом зависит от емкости памяти.

Но наибольший интерес представляют способности человека перерабатывать информацию, качественно и количественно оперировать входными и накопленными данными. Оценка скорости переработки информации базируется на представлении оператора в виде информационного канала. При таком подходе предполагается, что оператор передает

информацию со скоростью, зависящей от конкретной задачи. Если в данной задаче передается больше информации (измеряемой в двоичных единицах), то для ее переработки требуется более длительное время. Преобразование информации человеком-оператором эквивалентно переработке информации в ЭВМ.

Исследования показывают, что в большинстве случаев между временем, затрачиваемым на переработку информации, и скоростью передачи информации существует линейная зависимость, соотношение сохраняется также и тогда, когда операторы ускоряют темп, но допускают ошибки. Появление ошибок сокращает объем передаваемой информации настолько, насколько их количество возрастает благодаря росту скорости передачи.

Оператор, наблюдающий за системой, действует эквивалентно стробирующему устройству или фильтру, так как он всегда чутко следит за теми данными, которые свидетельствуют об отклонении от нормального функционирования системы.

Все больше операторам в системах поручаются задачи, связанные с переработкой информации, особенно, когда содержание решения важнее скорости переработки информации. В автоматизированных РТС основная роль, выполняемая оператором, сводится к функции наблюдения. Во всех случаях принятие оптимальных решений происходит в условиях неопределенности. Поэтому при исследовании процессов принятия решений оператором используются модели, основанные на теории игр и теории статистических решений.

Но при этом нужно иметь в виду, что в реальном мире мы редко располагаем данными о вероятности любого из альтернативных состояний системы или объекта, а также о величине возможного выигрыша или проигрыша при любом решении. Кроме того, к трудностям исследований следует отнести то, что люди в отдельных ситуациях не удовлетворяют даже простейшим аксиомам рационального поведения.

В более общей постановке задачи оператору приходится перерабатывать информацию по мере ее поступления и затем принимать последовательность из одного или более решений, которые могут быть взаимозависимыми или нет. Этот случай более сложен для анализа.

Выходное воздействие оператора на систему — наиболее сложное звено для анализа. Любой «выход» (сигнал) человека зависит от функционирования какой-то части его мускулатуры, которая содержит цепи обратной связи, взаимодействующие с центральной нервной системой, являющейся центральной системой переработки информации. Таким образом, выходное воздействие тесно связано с функционированием всей схемы структурного звена, представителем которого является оператор.

Требования точности движения оператора налагают ограничения на скорость движения. Чем меньше допуск на погрешность движения относительно его амплитуды, тем больше времени уходит на это движение. Как показывают исследования [9, 10, 16], существует максимальная скорость сокращений любых типов мышц, которая позволяет совершать не более 8...10 движений в секунду.

Было выполнено много работ, посвященных исследованиям влияний динамических характеристик составляющих звеньев системы «человек — техника» на общую эффективность системы в целом. При таком анализе система «человек — техника» представляется в виде следующей упрощенной схемы (рис. 11.4). На этом рисунке представлена элементарная структурная одноконтурная схема замкнутой системы «человек — техника». На практике часто один оператор управляет рядом систем

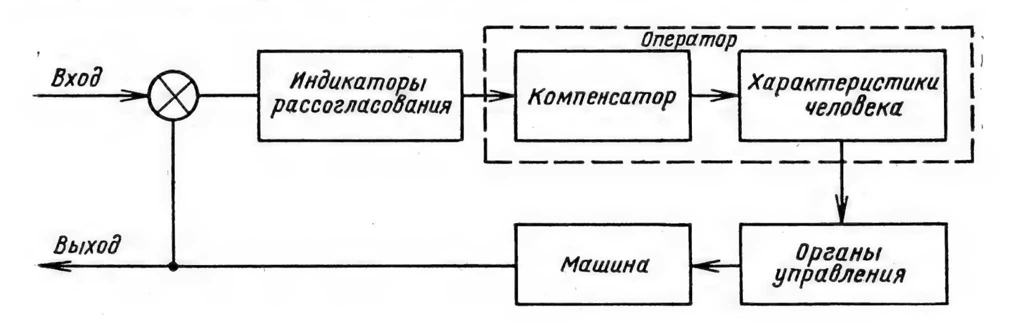


Рис. 11.4. Структурная схема системы «человек—техника» с оператором в цепи обратной связи.

или, наоборот, несколько операторов управляют одной РТС. Кроме того, само звено «техника» может иметь устройство автоматического регулирования, информация с которого также выводится на индикаторы. Для простоты анализа ограничимся рассмотрением только схемы, изображенной на рисунке.

Левая часть звена «оператор» отражает способность человека приспосабливаться к требованиям управляемой им системы и представляется передаточной функцией вида $K(T_2p+1/T_1p+1)$, где p — комплексная переменная изображения функции по Лапласу; T_2 — постоянная времени опережения; T_1 — постоянная времени запаздывания; K — коэффициент усиления, изменяющийся в широких пределах. T_1 может изменяться от 5 до 15 с. Постоянная времени опережения T_2 изменяется в пределах 0...5 с, но для значений более 1 с требуется больше затратить усилий оператору. Это опережение используется оператором для компенсации присущей ему задержки времени и нейромышечного запаздывания.

Правая часть звена описывает особенности, присущие человеку, и представляется передаточной функцией вида $\exp(-\tau p)/T_N p+1$. Здесь $\exp(-\tau p)$ характеризует чистое передаточное запаздывание, где τ принимается 0,14 с. А функция $1/T_N p+1$ описывает нейромышечное запаздывание и будет $\approx 0{,}1$ с, где T_N — постоянная времени нейромышечного запаздывания.

Из рассмотрения передаточных функций звена «оператор» можно сделать вывод, что человек-оператор выполняет функции адаптивного оптимального регулятора. Исходя из этого, делают вывод, что в процессе работы оператор стремится минимизировать среднеквадратическую ошибку и поддерживать постоянный сдвиг по фазе. До тех пор, пока частота входных воздействий и быстродействие объекта позволяют человеку удовлетворять этим требованиям не выходя за пределы его возможностей к адаптации, он делает всю систему «человек — техника» оптимальной по минимуму среднеквадратической ошибки.

11.3. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ОПЕРАТОРА В СИСТЕМЕ «ЧЕЛОВЕК—ТЕХНИКА»

Способность оператора выполнять заданные функции с требуемой эффективностью характеризуется уровнем работоспособности, который проявляется как относительное увеличение или уменьшение числа ошибок. Исследования показывают, что работоспособность не является стабильной характеристикой и изменяется в процессе работы; при этом различают три этапа (рис. 11.5).

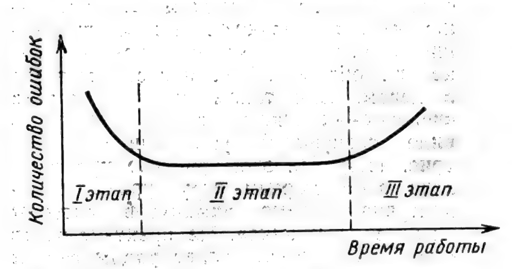


Рис. 11.5. Работоспособность оператора за время дежурства.

Первый характеризуется повышенным количеством ошибок и его называют этапом «прирабатываемости». Большое количество ошибок на этом этапе объясняется тем, что непосредственно перед началом деятельности оператор находился совершенно в иных условиях. Это может быть отдых, сон, другой вид работ и т. д., поэтому на начальном этапе существует рассогласование между состоянием психофизиологических функций оператора и требованиями операторской деятельности. Затем в результате функциональной перестройки вырабатывается (или восстанавливается) динамический стереотип деятельности, с установлением которого начинается второй этап работы. Он определяется относительным постоянством числа ошибок. Во время второго этапа деятельность нервно-мышечной системы оператора настроена на ритм и темп выполнения операций. С момента проявления утомления начинается третий этап работоспособности оператора. Субъективно утомление ощущается человеком как чувство усталости.

Для решения задачи повышения эффективности системы «человек — техника» значительный интерес представляет исследование изменения работоспособности операторов при непрерывной работе и воздействии на них факторов, вызывающих утомление и высокое нервное напряжение.

В любом режиме эксплуатации проявляется биологическая надежность обслуживающего персонала, определяемая окружающими условиями и психофизиологическим состоянием оператора. Функционирование системы «человек — техника» во многом зависит от степени приспособленности техники и условий труда к человеку и от состояния оператора в процессе трудовой деятельности, которые представляют собой факторы, определяющие эффективность системы в целом. К таким факторам можно отнести:

— индивидуальные особенности оператора;

— эксплуатационные особенности техники — размещение пультов, органов управления и сигнализации, объем и форма представления информации, требуемые ответные действия, удовлетворение эстетических требований;

— условия труда — температура, влажность, давление, скорость движения и состав воздуха окружающей среды, шум, вибрации и т. д.;

— организацию труда — продолжительность и чередование работы, продолжительность и характер отдыха, питание и т. д.;

— обученность — уровень знаний, опыт практической работы, стойкость профессиональных навыков;

— характер трудовой деятельности — степень умственной и физической нагрузки, монотонность, эмоциональная напряженность.

Каждый из этих факторов является предметом самостоятельных исследований, рекомендации которых могут быть использованы для повышения эффективности системы «человек — техника». При этом решается следующий круг задач: оптимизация условий труда, определение компоновки пультов системы, организация рабочих мест, конструирование средств индикации, выбор информационной модели в системе, конструирование органов управления, классификация и распределение задач и функций оператора и машины.

В частности, на рабочие характеристики оператора, влияют освещение, цветовое оформление, температура, влажность и чистота воздуха, а также наличие и уровень помех: вибрации, шумов, воздействия ускорений и нагрузок и др. Перечисленные факторы должны учитываться при проектировании систем и мест для их размещения; при организации различных режимов эксплуатации должны разрабатываться средства эффективной защиты от вредного влияния факторов среды на работоспособность операторов.

На качество труда оператора большое влияние оказывает освещение его рабочего места. Контраст между наблюдаемым объектом и окружающей средой может не только повлиять на удобство зрительного восприятия, но и помочь в сосредоточении его внимания на работе.

Использование контраста для сосредоточения внимания определяется фототропическим эффектом, т. е. тенденцией глаза передвигаться на более яркую часть визуального поля. Фототропический эффект можно использовать, если сделать окружение темнее, чем объект наблюдения, примерно в 3 раза. Для удобства зрительного восприятия яркость объекта наблюдения не должна отличаться более чем в 3 раза от яркости непосредственного окружения, которое, в свою очередь, не должно отличаться более чем в 3 раза от общего окружения.

Регулировка контрастности может быть достигнута как балансированием локального и общего освещения, так и

использованием цвета. Обычно оба эти фактора рассматриваются вместе. Целью распределения цветов на рабочем месте является более легкое наблюдение за рабочим объектом и удобное зрительное восприятие. Для получения эффекта теплоты следует использовать теплые насыщенные цвета, имеющие желтый, оранжевый и красный оттенки. Для получения эффекта холода и глубины используются холодные тона: голубой, серый и зеленый.

Исследования влияния температуры на состояние и поведение оператора показывает, что отклонение температуры от некоторого оптимального диапазона понижает как производительность труда, так и надежность действий человека-оператора. Температура окружающей среды примерно на уровне 20°C и влажность в пределах 30...70% для большинства людей являются комфортными. При этом следует иметь в виду, что «тепличные условия» могут действовать как монотонный раздражитель, вызывающий тормозное состояние.

Шум неблагоприятно воздействует не только на органы слуха человека, но и на всю нервную систему, вызывая утомление и снижение работоспособности, понижает внимательность. Улучшение акустических условий в помещениях предполагает проведение ряда мероприятий, направленных на уменьшение вибрации вентиляционного оборудования, так как вибрация и шум часто имеют общую причину.

Влияние на человека вибрации с большой частотой и малой амплитудой вызывает наиболее неблагоприятное физиологическое воздействие, вызывая головные боли, утомление, и в итоге снижает работоспособность операторов.

Эргономика устанавливает также общие принципы рациональной компоновки пультов управления системы и удобного размещения на них приборов, индикаторов и органов управления.

При определении положения оператора относительно пульта управления исходят из особенностей поля зрения. Оптимальной для обзора считается зона ясного различения формы рассматриваемых предметов при неподвижном глазе. При этом угол обзора в горизонтальной плоскости принимается 50...60°, в вертикальной плоскости 30° вверх и 40° вниз от линии взора.

Общая высота пульта должна быть не более 120 см от пола, если оператору нужно видеть пространство за пультом, и не более 165 см, если в таком обзоре нет необходимости. Оптимальная зона действия на пульте ограничивается 70 см.

Рабочее место следует планировать таким образом, чтобы оператор мог двигаться корпусом и имел возможность сгибаться в поясе. В случае продолжительных дежурств рабочее место должно позволять оператору менять свое положение. Мебель должна служить хорошей опорой для тела, максимально снижающей статические мышечные напряжения, и обеспечивать наименее утомительную рабочую позу.

Конструирование средств индикации и информационно-измерительных приборов должно производиться с учетом абсолютных и дифференциальных порогов ощущения и восприятия, а также пропускной способности анализаторов.

Эргономика дает рекомендации по оформлению лицевых частей цифровых и стрелочных приборов, шкал, различных индикаторов, разрабатывает требования к структуре и эстетике символических изображений на панелях информации пультов управления.

При конструировании органов управления должно учитываться, насколько диктуемые ими рабочие движения соответствуют рефлекторным реакциям человека. Ручки электрооборудования привычнее поворачивать по часовой стрелке для включения и увеличения тока и против часовой стрелки для выключения и уменьшения тока.

Форма кнопок, клавиш и тумблеров должна соответствовать анатомическому строению пальцев человека.

При оценке индикаторных устройств следует учитывать, что уровень яркости для всех цветов, кроме красного, должен быть одинаков. Красные транспаранты должны быть вдвое ярче по отношению ко всем остальным. Световые сигналы, требующие немедленного действия оператора, должны быть видны ему при всех положениях на рабочем месте.

Все рассмотренные требования должны учитываться и при создании тренажеров различного типа.

11.4. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ОПЕРАТОРА

В настоящее время в области эргономических исследований все более утверждается мысль, что количественно надежность оператора может быть выражена в тех же категориях, которыми оценивается надежность технических систем.

Применительно к оператору под отказом понимается состояние, приводящее к полному или частичному невыполнению поставленной задачи в результате совершаемых им ошибок. Статистическая информация для оценки деятельности оператора основывается на подсчете количества ошибок в работе оператора за определенный отрезок времени.

В качестве основного показателя надежности оператора используется вероятность его безотказной работы за заданный отрезок времени [34].

В этом случае, как показано в § 2.3, оценку надежности работы системы «человек — техника» в целом можно производить по соотношению (2.33).

Пока еще не разработаны строго количественные оценки психофизиологического состояния человека и неизвестны пределы их допустимых значений, определяемых требованиями конкретных профессиональных особенностей. Поэтому многими исследователями вероятность безотказной работы оператора $P_ч$ за установленное время t определяется по статистическим данным. По этим данным строятся статистические функции частоты отказов f^*_o. Затем подбирается теоретическая функция $f_o(t)$, лучше всего согласующаяся с графиком $f_o(t)$, и по ней определяются параметры полученного распределения и вычисляется вероятность безотказной работы оператора

$$P_ч = \int_0^t f_o(t)\, dt.$$

Такие статистически определяемые показатели надежности оператора вычисляются для каждой конкретной РТС.

Указанный подход к определению надежности оператора отождествляет понятие «надежности оператора» с безошибочностью выполнения им требуемых функций, т. е. несколько сужает понятие надежности, но зато дает возможность определить надежность оператора как отдельного элемента, входящего в систему «человек — техника».

При более широком подходе к оценке надежности системы «человек — техника» с учетом взаимного влияния обеих составляющих системы выделяют несколько реальных вариантов разграничения свойств технических систем и операторов. Так, например, в [34] рассматривается семь вариантов. Приведем некоторые из них.

Аппаратурная безотказность применяемых систем. Она характерна только для необслуживаемых, неподготавливаемых и неуправляемых систем. Надежность системы полностью определяется возникновением ее отказов. Влияние оператора не учитывается.

Восстанавливающий оператор. Оператор влияет на состояние технических систем только устранением возникших отказов. При этом учитываются только безотказность и восстанавливаемость системы.

Оператор, идеальный в смысле готовности и безошибочности управления. В этом случае оператор готов к работе в начале выполнения операций в режиме подготовки, а в режиме применения не допускает ошибок управления.

Оператор, идеальный в смысле готовности. Он постоянно находится в готовности выполнять необходимые опе-

рации по подготовке системы, но может допускать ошибки. В этом случае учитывается влияние оператора на все процессы, происходящие в системе.

Биологически надежный оператор. При этом учитывается готовность оператора к работе, он может допускать ошибки и т. д.

Применение подобных вариантов при оценке надежности систем «человек — техника» конкретизирует используемые подходы к задаче, решаемой при определении надежности в каждом отдельном случае. При таком подходе в выражение (2.33) дополнительно войдут различные значения вероятностей, учитывающих то или иное свойство оператора. Например, вероятность готовности оператора к работе, вероятность восстановления аппаратуры оператором, вероятность подготовки аппаратуры за требуемый отрезок времени и т. д. Полагая взаимонезависимость таких событий, видим, что (2.33) представляет собой сумму произведений вероятностей учитываемых свойств.

11.5. ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ ОТБОР И ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА

Особенности работы оператора РТС определяются рядом объективных факторов: своеобразием конструкции системы и ее управления, спецификой решаемых задач, окружающими условиями. Оператор управляет не кнопками, переключателями и приборами, а системой в целом. Успех управления во многом зависит от того, насколько глубоко оператор понимает сущность работы РТС и верно оценивает обстановку. Правильное понимание работы РТС и отображающих устройств требует от оператора абстракции, активного участия воображения и мышления. При работе с радиотехнической аппаратурой у оператора формируется определенный тип профессионально-технического мышления.

Указанные обстоятельства поставили вопрос о профессиональном отборе кандидатов для освоения и выполнения в последующем операторских обязанностей.

Под *профессиональным отбором* понимается процесс выбора из группы кандидатов на определенную профессию тех лиц, от которых можно ожидать с наибольшей вероятностью эффективного выполнения данного объема задач. Суть профессионального отбора состоит в тщательном сопоставлении структуры операторской деятельности и структуры личности кандидата, характеризуемой единством и взаимосвязью основных сторон личности: целеустремленности, способности, темперамента и характера.

Обилие поступающей информации, воздействие различных факторов, вызывающих утомление, требуют от операторов большого напряжения. Естественно, что в зависимости от индивидуальных свойств тот или иной оператор может лучше или хуже справиться с выполнением заданных функций. С другой стороны, чем лучше органы управления системы приспособлены к оператору, тем лучше она будет работать, поскольку оператор сможет более качественно выполнять свои функции.

В настоящее время подбор и расстановка людей для выполнения функций оператора в системе «человек — техника» проводятся с обязательным учетом комплекса психофизиологических свойств человека, среди которых важную роль играют временные характеристики.

Оператор часто является наименее точным звеном системы «человек — техника» и звеном наиболее широкого назначения. Поэтому со-

кращение его ошибок, уменьшение его запаздывания может быть более эффективным для всей системы, чем сокращение ошибок «машинных звеньев», имеющих высокую точность.

В связи с тем, что к оператору предъявляются особые требования, его надо предварительно выбирать из имеющегося контингента кандидатов. С точки зрения роли оператора в системе «человек — техника» не все его характеристики являются существенными.

При формировании групп обслуживающего персонала для работы на больших системах наряду с высоким уровнем технической подготовки важную роль играет психологическая совместимость членов коллектива. Иногда психологический фактор является решающим для правильного подбора состава операторов.

Советскими учеными [10, 28] разработаны основы комплексного инженерно-психологического подхода к профессиональному отбору. При отборе должны выявляться психофизиологические качества, связанные с нейрофизиологическими особенностями человека, его потенциальные способности к овладению необходимой системой знаний, умение и навыки, моральные и волевые свойства личности. При этом учитывается выносливость, эмоциональность, стойкость психики к различным раздражителям, его интересы, политическая убежденность, моральная устойчивость, целеустремленность и т. д.

Профессиональный отбор осуществляется в настоящее время следующими методами: стихийным, медицинским, конкурсным и инженерно-психологическим.

При стихийном — кандидатом на должность оператора назначается согласно набору любой из участников без учета его индивидуальных способностей.

При медицинском — обычно учитывается лишь один фактор — состояние здоровья. По заключению медицинской комиссии о пригодности к работе на РТС отобранные кандидаты могут назначаться на должности операторов.

При конкурсном — кандидаты на должности операторов отбираются проверкой их индивидуальных способностей с помощью экзаменов или тестов.

При инженерно-психологическом — кандидаты на должности операторов отбираются с полным учетом антропологических, физиологических, психологических и других данных.

В основе инженерно-психологического метода отбора лежат два основных принципа: активность и этапность отбора.

Под активностью отбора понимают не только факт выбора кандидатов на должности операторов, но и совершенствование органов управления техникой и методов обучения. Основные направления — максимальное приспособление органов управления к функциональным характеристикам человека, рациональная автоматизация ряда операций, разработка алгоритмических систем обучения, оптимизация режимов тренировок, внедрение средств повышения функциональных характеристик человека.

Под этапностью отбора понимают последовательность работы по отбору кандидатов. Наиболее перспективным представляется проведение трехэтапного отбора.

Первый этап — отбор по заключению медицинских комиссий. Его основная задача состоит в том, чтобы исключить лиц, которые по состоянию здоровья не могут выполнять те или иные функциональные

обязанности операторов. На втором этапе определяется степень пригодности того или иного индивидуума для выполнения профессиональных обязанностей. Третий этап отбора является контрольным. В его задачу входит: во-первых, своевременное выявление среди обучающихся или уже работающих специалистов лиц, которые не могут эффективно выполнять свои функциональные обязанности; во-вторых, определение точности и правильности первых этапов отбора.

В качестве критериев, объективно определяющих степень подготовленности кандидатов, а также для оценки подготовленности операторов наиболее целесообразно использовать среднее значение времени выполнения операции (либо группы операций) и среднеквадратическое отклонение этого времени. При определении критериев чаще принимают гипотезу о бета-распределении времени выполнения операций. В этом случае методика определения критериев отличается простотой расчетов и приемлемой точностью.

Пусть $T_{мин}$ — минимальное время выполнения операции высокоподготовленным оператором; тогда выбором соответствующих коэффициентов ($1<K_1<K_2<K_3$) определяют нормативное время выполнения операции: $K_1T_{мин}$ — отличным $K_2T_{мин}$ — хорошим и $K_3T_{мин}$ — удовлетворительным оператором. Под *нормативным временем* понимается такой интервал времени выполнения операции, который определяется либо способностями человека-оператора, либо условиями технического процесса.

Если известно среднеквадратическое отклонение времени выполнения операций $\sigma_{мин}$ отличным оператором, то $n_2\sigma_{мин}$ и $n_3\sigma_{мин}$ — среднеквадратические отклонения времени выполнения операции хорошим и удовлетворительно работающим оператором ($1<n_2<n_3$).

Величины $T_{мин}$ и $\sigma_{мин}$ определяются по результатам контрольных испытаний высокоподготовленных операторов.

Коэффициенты K_1 и K_2 определяются из соотношения

$$K_1T_{мин}-T_{мин}=K_2T_{мин}-$$
$$-K_1T_{мин}=K_3T_{мин}-K_2T_{мин},$$

которое дает значения K_1 и K_2 независимо от значения $T_{мин}$:

$$K_1=(K_3+2)/3;\quad K_2=(2K_3+1)/3.$$

K_3 определяется из допустимых нормативов выполнения операции.

Коэффициенты n_2 и n_3 обычно принимают равными $n_2=1{,}5 \ldots 2$; $n_3=2 \ldots 3$. Меньшие значения берутся для контроля подготовленности операторов, бо́льшие — при отборе кандидатов для обучения.

В зависимости от целей отбора и величины контингента испытуемых для обучения отбирают либо кандидатов, получивших только оценку «отлично», либо оценки «хорошо» и «отлично», либо получивших положительную оценку.

Формирование обслуживающего персонала для несения постоянных дежурств и выполнения сложных ответственных работ выявило недостаточность для этой цели системы индивидуального профессионального отбора и стимулировало разработку методов группового профессионального отбора. При этом необходимо производить интегральную оценку обслуживающего персонала, относясь к группе не как к сумме индивидов, а как к некоему объединенному в одно целое организму. Рассматривая автономность действий обслуживающего персонала, следует помнить, что в такой группе образуется сложное сочетание эмоциональных, волевых и информационных связей. В процессе работы в группе возникает функциональная соподчиненность, предполагающая необходимость распределения функциональных обязанностей между отдельными операторами. При формировании групп необходимо соблюдать психофизиологическую совместимость, предполагающую оптимальное сочетание людей, в основу которого положены общность идей и целей, вкусов и привычек, сходность динамической направленности эмоционально-вегетативных реакций, взаимоподражание и др.

Самым интересным свойством оператора является то, что он может в результате обучения достичь приближения своей передаточной функ-

ции к наперед заданному виду. Имея ограниченные количественные характеристики, оператор обладает гибкими возможностями и легко приспосабливается к любой машине и к любой операции.

С помощью специальных методов психологической подготовки можно довести до высокого уровня развития необходимые оператору нейрофизиологические функции: внимание, быстроту и точность переработки получаемой извене информации, точность идеомоторных представлений, способность саморегуляции своих эмоциональных состояний, а также волевые качества. Поэтому повышение возможностей оператора целесообразно проводить по линии повышения информационных способностей, снижения времени реакции, снижения времени формирования решения, повышения надежности работы методом контроля.

Большую роль в системе профессиональной подготовки операторов, а также в системе поддержания на требуемом уровне профессиональных навыков играют тренажеры. Моделирование операторской деятельности с помощью тренажеров имеет важное значение в системе подготовки операторов, позволяет выявить конструктивные недостатки систем и обнаружить инженерно-психологические дефекты согласования человека и техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамов С. А.** Сетевые методы планирования. М., «Сов. радио», 1965.
2. **Автоматизация** радиоизмерений. Под ред. В. П. Балашова. М., «Сов. радио», 1966. Авт.: В. П. Балашов, Р. А. Валитов, Г. П. Вихров и др.
3. **Автоматический** поиск неисправностей. Под ред. А. В. Мозгалевского. М., «Машиностроение», 1967. Авт.: А. В. Мозгалевский, Д. В. Гаскаров, Л. П. Глазунов, В. Д. Ерастов.
4. **Астафьев А. В.** Окружающая среда и надежность радиотехнической аппаратуры. М., «Энергия», 1965.
5. **Введение** в техническую диагностику. Под ред. К. Б. Карандеева. М., «Энергия», 1968. Авт.: Г. Ф. Верзаков, Н. В. Киншт, В. И. Рабинович, Л. С. Тимонен.
6. **Гельфандбейн Я. А.** Методы кибернетической диагностики динамических систем. Рига, «Зинатне», 1967.
7. **Долгов В. А.** Встроенные автоматизированные системы контроля. М., «Энергия», 1967.
8. **Дружинин Г. В.** Процессы технического обслуживания автоматизированных систем. М., «Энергия», 1973.
9. **Инженерная** психология. Пер. с англ. Сб. статей. Под ред. Д. Ю. Панова, В. П. Зинченко, М., «Прогресс», 1964.
10. **Инженерно-психологические** требования к системам управления. Сб. статей. Под ред. В. Л. Эличенко. М., НИИЭТ, 1968.
11. **Карибский В. В., Пархоменко Т. П., Сомогонян Е. С.** Техническая диагностика объектов контроля. М., «Энергия», 1967.
12. **Касаткин А. С., Коменда Э. И.** Статистическая оптимизация аппаратуры контроля. М., «Энергия», 1970.
13. **Кокс Д., Смит В.** Теория восстановления. Пер. с англ. Под ред. Ю. К. Беляева. М., «Сов. радио», 1967.
14. **Лебедев М. Д.** Состояние и развитие автоматических систем контроля. М., «Энергия», 1968.
15. **Контроль** и испытания. Основные термины и определения. ГОСТ 16504—74. М., Издательство стандартов, 1975.
16. **Ломов Б. Ф.** Человек и техника. М., «Сов. радио», 1966.
17. **Малинский В. Д.** Контроль и испытания радиоаппаратуры. М., «Энергия», 1970.
18. **Михайлов А. В.** Эксплуатационные допуска и надежность в радиоэлектронной аппаратуре. М., «Сов. радио», 1970.
19. **Надежность** в технике. Термины и определения. ГОСТ 13377—75. М., Издательство стандартов, 1975.
20. **Основы** эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры. Под ред. В. Ю. Лавриненко. М., «Высшая школа», 1968. Авт.: А. К. Быкадоров, Л. И. Кульбах, В. Ю. Лавриненко, И. Н. Рысейкин, В. Л. Тихомиров.
21. **Павлов Б. В.** Кибернетические методы технического диагноза. М., «Машиностроение», 1966.
22. **Порядок** сдачи в ремонт и приемки из ремонта. Общие требования. ГОСТ 19504—74. М., Издательство стандартов, 1974.

23. **Путинцев Н. Д.** Аппаратный контроль цифровых вычислительных машин. М., «Сов. радио», 1966.
24. **Правила** технической эксплуатации радиотелевизионных передающих станций. М., «Связь», 1970.
25. **Правила** технической эксплуатации средств внутриобластных и внутрирайонных радиосвязей. М., «Связь» 1969.
26. **Репин А. С.** Организация и эксплуатация предприятий радиосвязи и радиовещания. М., Связьиздат, 1953.
27. **Система** технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. ГОСТ 18322—73. М., Издательство стандартов, 1974.
28. **Система** «Человек и автомат». Сб. статей. Под ред. Д. А. Ошанина, М. Г. Гаазе-Рапопорта, А. Я. Лернера. М., «Наука», 1965.
29. **Степанов С. В.** Профилактические работы и сроки их проведения. М., «Сов. радио», 1972.
30. **Теория** и практика эксплуатации радиолокационных систем. Под ред. С. М. Латинского. М., «Сов. радио», 1970. Авт.: С. М. Латинский, В. И. Шарапов, С. Н. Ксенз, С. С. Афанасьев.
31. **Точность** измерения параметров движения космических аппаратов радиотехническими методами. Под ред. С. Д. Сильвестрова. М., «Сов. радио», 1970. Авт.: С. Д. Сильвестров, В. М. Лазарев, А. И. Корниенко, М. И. Паншин.
32. **Шишонок Н. А., Репкин В. Ф., Барвинский Л. Л.** Основы надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники. М., «Сов. радио», 1964.
33. **Шор Я. Б., Кузьмин Ф. И.** Таблицы для анализа и контроля надежности. М., «Сов. радио», 1964.
34. **Фокин Ю. Г.** Надежность при эксплуатации технических средств. М., Воениздат, 1970.
35. **Эксплуатационная** и ремонтная документация. ГОСТ 2.601—68...2.605—68. М., Издательство стандартов, 1969.
36. **Электрические** методы автоматического контроля. Под ред. К. Б. Карандеева. М.—Л. «Энергия», 1965. Авт.: К. Б. Карандеев, Б. В. Карнюк, А. Н. Касперович, Б. М. Тушной, В. И. Рабинович, Б. С. Синицын, П. Е. Твердохлебов, М. П. Цапенко.

Раздел III

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УСТРОЙСТВ И ПОДГОТОВКА КОМПЛЕКСА К ПРИМЕНЕНИЮ

Несмотря на большое разнообразие РТС [1, 5, 18, 30, 34, 36] все они имеют устройства, блоки, узлы, однотипные с точки зрения их эксплуатации. Это: радиопередатчики, радиоприемники, антенно-фидерные, волноводные и переключающие СВЧ энергию устройства, устройства выделения и обработки измеряемого параметра, регистрирующие, преобразующие, синхронизирующие и другие устройства. Неотъемлемой частью каждой РТС является источник питания с элементами преобразования, стабилизации напряжения, защиты и автоматики. Каждое из устройств, составляющих систему, выполняет свои, присущие ему, функциональные задачи и требует специфического подхода к проверке, контролю и измерению его параметров и характеристик.

В данном разделе рассматриваются вопросы проверки технического состояния наиболее характерных устройств и системы в целом при подготовке РТК к применению, а также некоторые вопросы соблюдения существующих норм и правил безопасности при этих работах.

Глава 12

РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

12.1. ТИПЫ РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ПАРАМЕТРЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ КОНТРОЛЮ

Эксплуатация радиопередающих устройств в значительной степени определяется назначением, местом установки, диапазоном рабочих частот, величиной мощности высокочастотных колебаний и видом сигнала. Здесь будем рассматривать радиопередающие устройства с аналоговыми и импульсными методами модуляции. Такие передатчики резко различаются между собой по уровню мощности высокочастотных колебаний, стабильности частоты, спектру излучаемого сигнала, уровню внеполосного излучения и уровню собственных шумов. Кроме того, такие же принципиальные различия имеются в комплектующей и сопутствующей аппаратуре, начиная от источников питания и кончая измерительной аппаратурой.

К числу основных показателей, которые необходимо измерять или контролировать в процессе эксплуатации, относятся:

— мощность высокочастотных колебаний и мощность, потребляемая от источника питания;

— номинал высокой частоты, ее стабильность и уровень побочных излучений;

— электроакустические характеристики в передатчиках с аналоговой модуляцией;

— параметры радиоимпульса (форма, длительность и высокочастотный спектр) в передатчиках с импульсной модуляцией;

— затухание в антенно-волноводном тракте;

— надежность работы цепей управления, блокировки и сигнализации.

В практике эксплуатации РТС для измерения параметров широкое применение находят как встроенные в аппаратуру измерительные приборы, так и переносные.

Приборы встроенного типа позволяют быстро и с достаточной степенью точности измерить основные технические параметры, характеризующие нормальное функционирование системы.

Встроенная контрольно-измерительная аппаратура развивается в направлении создания автоматических устройств, осуществляющих непрерывный контроль технических параметров системы без нарушения ее нормального функционирования. Сопряжение встроенной измерительной аппаратуры со счетно-решающими устройствами открывает широкие возможности для автоматизации проверок комплекса в целом, прогнозирования возможных отказов и выдачи рекомендаций по устранению возникших неисправностей. С помощью автоматизированных систем контроля [9] может производиться настройка и регулировка аппаратуры, проверка ее работоспособности перед использованием и в процессе работы, поиск неисправностей блоков и автоматическое включение резервных, прогнозирование постепенных отказов, проверка аппаратуры при профилактических и ремонтных работах.

Наряду с измерительными приборами, определяющими численное значение измеряемых величин, широко применяются приборы индикаторного типа, позволяющие производить качественную и грубую количественную оценку проверяемого процесса или технического параметра. Эти приборы не заменяют измерительные приборы, а дополняют их. Основным достоинством индикаторных приборов является непрерывная готовность их к действию, быстрота и удобство контроля за работой системы.

Для измерения основных технических параметров в ряде случаев используются переносные комбинированные испытательные приборы радар-тестеры. Достоинством их является компактность и возможность комплексной проверки и измерения ряда технических параметров.

Однако как встроенные контрольно-измерительные приборы, так и радар-тестеры являются приборами, специфичными для определенной аппаратуры. По ряду причин они не всегда могут быть использованы для проверки параметров РТС другого типа и назначения.

Большими возможностями по диапазону измеряемых величин, точности, универсальности в использовании обладают переносные измерительные приборы. Измерение параметров с помощью некоторых из этих приборов требует относительно большого времени и не позволяет осуществлять непрерывный контроль за техническим состоянием системы. Переносные контрольно-измерительные приборы используются, главным образом, при проведении профилактических мероприятий и при послеремонтных проверках технических параметров системы, а также и для текущего контроля параметра, когда отсутствует в системе встроенная контрольно-измерительная аппаратура.

12.2. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ К. П. Д. ПЕРЕДАТЧИКА

Мощность высокочастотных колебаний является одним из наиболее важных параметров передатчика, определяющих дальность и надежность линии радиосвязи. В технической документации на передатчики указывается значение мощности при соответствующем виде работы, ко-

торая должна обеспечиваться на определенной частоте (или диапазоне частот). Согласно установившимся определениям под *мощностью высокочастотных колебаний передатчика* понимают мощность, которая отдается им в согласованную нагрузку. Такой нагрузкой может быть антенна либо эквивалент антенны, применяемый в тех случаях, когда по ряду соображений излучение недопустимо. Например, для телеграфных передатчиков эта мощность относится к режиму посылки (нажатия ключа), для телефонных — к режиму несущей частоты, а для однополосных — к режиму наибольшего значения огибающей высокочастотного сигнала. В отдельных случаях, чаще всего для маломощных передатчиков, под мощностью понимают полную колебательную мощность выходного каскада. Особенности контроля колебательной мощности импульсных СВЧ передатчиков рассмотрены в § 12.6.

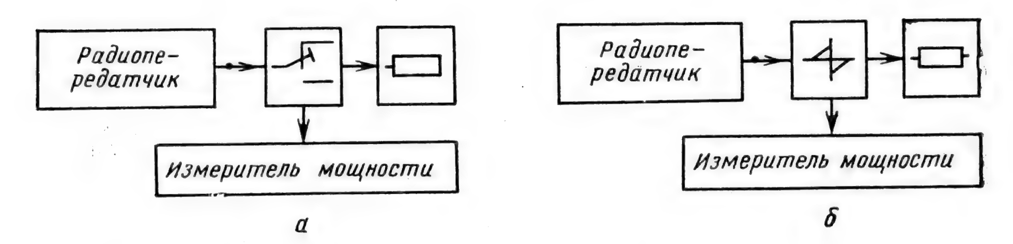


Рис. 12.1. Функциональная схема подключения измерителей мощности:
а — для прибора поглощающего типа; *б* — для прибора проходящей мощности.

Существуют два основных способа контроля мощности высокочастотных колебаний в условиях эксплуатации:

— измерение мощности на сопротивление нагрузки;

— измерение проходящей мощности.

В первом случае вся измеряемая мощность высокочастотных колебаний поглощается в нагрузочном элементе. Реальная нагрузка в этом случае от генератора отключается (рис. 12.1,*а*). Для измерения высокочастотной мощности и используются приборы поглотительного типа, к ним относятся, например, калориметрические. Калориметрические измерители (табл. 12.1) наиболее универсальны по диапазону измеряемых мощностей и рабочих частот. Они применяются для измерения мощности непрерывных колебаний, среднего значения с различными видами модуляции, а также импульсной мощности. Погрешность их находится в пределах 5 ... 10%.

Нагрузочный элемент измерителя мощности должен быть согласован с генератором. В случае неполного согласования, частично мощность, поступающая от генератора к нагрузочному элементу прибора, отразится и измеритель будет фиксировать лишь часть полной колебательной мощности. Поскольку прибор подключается вместо антенны, измерить мощность при работе на реальную нагрузку при этом невозможно.

Во втором случае (рис. 12.1,*б*) измеряется определенная, точно известная доля проходящей в нагрузку высокочастотной мощности. Отбор мощности из основной линии во вспомогательную осуществляется с помощью зондов или направленных ответвителей. Условия согласования в основной линии при этом не должны нарушаться.

Для измерения малых мощностей, непрерывных и импульсно-модулированных колебаний среднего значения мощности применяются термисторные и термоэлектрические приборы (табл. 12.2). Эти приборы также работают в широком диапазоне частот. В большинстве случаев термисторные приборы — это приборы поглощающего типа. В качестве

Таблица 12,1

Калориметрические измерители мощности [28]

Тип прибора	Диапазон рабочих частот, ГГц	Диапазон измеряемых мощностей, Вт	Время установления показаний, с	ВЧ тракт		КСВ
				коаксиальный, Ом	волноводный, мм	
М3-11А	0,001...11,5	0,003...10	25	50	10/4,34	1,25...1,6
М3-13	0,003...1,6	20...2000	180	75	40/11,5	1,3

Примечание. Прибор М3-13 предназначен для измерения мощности непрерывных и импульсных колебаний.

сопротивления, на котором рассеивается высокочастотная мощность, в них используются термисторы. Часто термисторные головки делаются выносными и сменными.

Таблица 12.2

Термисторные и термоэлектрические измерители мощности [28]

Тип прибора	Диапазон рабочих частот, ГГц	Диапазон измеряемых мощностей, Вт	Преобразователь термисторной головки	ВЧ тракт	
				коаксиальный, Ом	волноводный, мм
М3-1А	0,02...3	0,1...1 000	Встроенный с КСВ 1,3...1,7	75	16/4,6
М3-21	0,1...37,5	0,01...10	Термоэлектрический выносной с КСВ 1,5...1,6	50	35×15 23×10 17×8 11×5,5 7,2×3,4
М3-22	0,15...78,5	0,012...6	Выносной волноводный и коаксиальный		35×15 23×10 и др.

В случае отклонения мощности от требуемой по техническим условиям, установленной на данный радиопередатчик, следует путем соответствующих регулировок восстановить ее номинальное значение. Для этого необходимо проверить настройку передатчика, обеспечить оптимальность режима работы выходного каскада с нагрузкой. Для СВЧ передатчиков следует проверить, не превосходят ли потери в антенно-волноводном тракте допустимых значений, и в случае необходимости улучшить согласование. Если после этого мощность восстановить не удалось, следует проверить режимы работы выходных и других обеспечивающих мощность приборов, проверить соответствие номиналу их параметров.

Восстановив колебательную мощность передатчика, можно перейти к определению его промышленного к. п. д. Он определяется обычно

при всесторонней проверке параметров радиопередатчика, например, после ремонта.

Для определения общего промышленного к. п. д. необходимо измерить мощность, потребляемую передатчиком от первичного источника: сети, электрогенератора и т. д. При этом следует учитывать только мощность, потребляемую в основных цепях передатчика (освещение, сигнализация, управление и другие вспомогательные цепи не учитываются).

Промышленный к. п. д. определяется как отношение высокочастотной мощности передатчика, подводимой к антенне (эквиваленту антенны) P_a, к мощности, потребляемой передатчиком от первичного источника P_0; $\eta = P_a/P_0$. Как правило, основные показатели передатчика (кроме высокочастотной мощности) должны сохраняться при колебаниях напряжения первичного источника в пределах $\pm 5\%$, а работоспособность (без гарантии сохранения параметров) — при отклонении того же напряжения на величину от $+10$ до -15%.

12.3. ДАТЧИКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОХОДЯЩЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МОЩНОСТИ

Для автоматических систем контроля проходящей высокочастотной мощности используются различного рода датчики [10], описание которых приводится ниже.

Термопарные полупроводниковые датчики. Для измерения средней и большой проходящей высокочастотной мощности в коаксиальных и волноводных трактах используются полупроводниковые термопары с нанесенным на них слоем, поглощающим электромагнитную энергию. Через поглощающий слой нагревается один конец термоэлемента, второй конец термоэлемента имеет температуру волноводного тракта за счет контакта с массой волновода. Таким образом, в полупроводнике образуется градиент температур, за счет которого получается термо-э. д. с. Термо-э. д. с. на выходе термопары линейно зависит от разности температур торцов термоэлемента $l = \alpha(T_1 - T_2)$.

Термоэлементы из SbZn имеют чувствительность 0,2 ... 0,25 мВ/град, а термоэлементы из сплава SbCd — 0,3 ... ... 0,4 мВ/град.

Полупроводниковые термоэлементы конструктивно изготовляются в виде цилиндра (свечи). Для исключения зависимости э. д. с. от фазы и величины коэффициента отражения в волноводе устанавливают два термоэлемента на расстоянии $\lambda_в/4$. При этом проходящая мощность определяется как $P = k\sqrt{e_1 e_2}$, где k — коэффициент пропорциональности; e_1 и e_2 — э. д. с. термоэлементов.

Частотная зависимость исключается путем установки нескольких термоэлементов.

В тех случаях, когда выходной сигнал термопарного датчика недостаточен, для обработки в системе контроля используются усилители постоянного тока с малым дрейфом нуля. При наличии стрелочного индикатора термопарный датчик используется как автономный измерительный прибор для встроенного контроля проходящей мощности.

Недостатком полупроводниковых термопарных датчиков является большая инерционность и малая чувствительность. Время установления максимальной э. д. с. достигает нескольких секунд. Технические характеристики термопарных датчиков для контроля проходящей мощности приведены в табл. 12.3. Все приборы имеют погрешность измерения $\pm 15\%$, М2-21 предназначен для измерения импульсной мощности.

Ферритовые датчики. В основе использования ферритов для измерения СВЧ мощности лежит явление ферромагнитного резонанса, которое наблюдается при наличии подмагничивающего поля. Магнитная энергия передается кристаллической решетке феррита, превращаясь в энергию ее тепловых колебаний. По тепловому действию поглощаемой в феррите электромагнитной энергии судят об СВЧ мощности. Наиболее перспективными для применения в качестве датчиков измерения СВЧ мощности являются шаровидные ферриты, так как у них частота ферромагнитного резонанса не зависит от температуры. По сравнению с полупроводниковыми термисторами, ферритовые термисторы обладают бо́льшим диапазоном рабочих мощностей. Кроме того, они

Таблица 12,3

Термопарные датчики [10]

Тип прибора	Диапазон рабочих частот, ГГц	Диапазон измеряемых мощностей, Вт	ВЧ тракт	
			коаксиальный, Ом	волноводный, мм
М2-7	5,5...3,9	100...1000	—	48×24
М2-8	4,0...2,6	200...1000	—	72×34
М2-9	4,0...2,6	500...2000	—	72×34
М2-16	1,0...1,5	5...1000	75	
М2-18	1,5...2,1	5...500	50	
М2-21	0,5...1,5	$100...5\cdot10^5$	75	

характеризуются такими новыми свойствами, как избирательным поглощением и некритичностью к перегрузкам.

Диодные датчики для измерения импульсной проходящей мощности основаны на методе измерения напряжения на сопротивлении нагрузки, шунтированной емкостью. Для уменьшения поступающего на диод напряжения используется слабая связь. Ламповые диодные датчики применяются в диапазоне до 3 ГГц. На более высоких частотах начинает сказываться инерция электронов, междуэлектродные емкости и пр., что приводит к значительной погрешности.

Контроль малых уровней мощности, а также импульсной мощности в диапазоне частот свыше 3 ГГц осуществляется с помощью датчиков на СВЧ полупроводниковых диодах. Обычно они применяются для относительной оценки проходящей мощности. В состав прибора входит направленный ответвитель с детекторной головкой и автокомпенсатор (усилитель-интегратор с обратной связью).

Подобные датчики позволяют контролировать импульсную мощность радиосигналов длительностью 1...200 мкс с частотой повторения 250...1 000 Гц при изменении амплитуды видеоимпульсов на входе усилителя-интегратора от 0,5 до 7 В. Погрешность датчика не превышает ±10%. Такие приборы позволяют измерить мощность падающей и отраженной волны. В случае, когда необходимо измерить проходящую мощность, осуществляется одновременное измерение мощности падающей и отраженной волн и с выхода двух пиковых вольтметров напряжения постоянного тока поступают на схему вычитания, на выходе которой получается напряжение, пропорциональное величине проходящей мощности.

Газоразрядные датчики. Для контроля СВЧ мощности в них используется эффект изменения проводимости плазмы под действием электромагнитной энергии. В результате взаимодействия поля с плазмой между электродами датчика возникает направленный диффузионный ток.

Газоразрядные датчики имеют двухэлектродную конструкцию и включаются в СВЧ тракт с помощью измерительной головки через направленный ответвитель. Детекторная характеристика существующих датчиков близка к линейной в диапазоне изменения средней мощности от 0,5 до 2 Вт и импульсной мощности в диапазоне 0,3...2 кВт. Крутизна характеристики по току на частоте 3 100 МГц в непрерывном режиме составляет 1,5...2 мА/Вт, а по напряжению в импульсном режиме 150 В/кВт. Датчик работоспособен при повышении сопротивления нагрузки и не выходит из строя при коротком замыкании электродов. Инерционность датчика 0,1 мкс.

Пьезоэлектрические датчики используются для измерения импульсной СВЧ мощности. Принцип действия их основан на деформации пьезоэлемента под действием электромагнитной энергии. Пьезодатчик накладывается на отверстие в узкой стенке волновода. Э. д. с. на электродах такого датчика пропорциональна энергии, вызвавшей его деформацию. Минимальный уровень измеряемой мощности 3...5 кВт в миллиметровом диапазоне волн, чувствительность датчика 0,1 ... 0,25 мВ/кВт при длительности импульса 0,1 ... 0,2 мкс. Суммарная погрешность не больше ±15%.

12.4. ЧАСТОТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В объем частотных измерений передатчика входит контроль несущей частоты, ее стабильности и уровня побочных излучений. Указанные частотные параметры в передатчике определяются возбудителем

частоты (задающим генератором). Стабильность частоты имеет исключительно важное практическое значение. В соответствии с рекомендациями международного консультативного комитета по радио допустимая относительная стабильность частоты передатчиков, работающих в полосе частот 2 450 ... 10 500 МГц, должна быть выше $3\cdot10^{-4}$. Для обеспечения беспоискового вхождения в связь и дальнейшего ведения ее без подстройки передатчики имеют относительную стабильность $10^{-5}\dots10^{-6}$, передатчики многоканальных линий связей, а также однополосные — $5\cdot10^{-7}$ [21]. Еще более высокой стабильностью обладают передатчики доплеровских систем измерения скорости [44].

Помимо возбудителей частоты передатчиков, в составе РТС могут находиться и другие источники высокочастотных колебаний. Основным требованием к подобным устройствам, как правило, является обеспечение выходного напряжения с заданной стабильностью частоты.

Частота сигнала является функцией времени, она имеет как монотонное изменение, так и статистические флюктуационные изменения:

$$\omega(t) = \omega_0 + \alpha\omega_0(t) + \Delta\omega(t), \quad (12.1)$$

где $\alpha\omega_0 t$ — систематическое изменение частоты; $\Delta\omega(t)$ — флюктуационное значение частоты, центрированное относительно усредненного значения частоты на интервале времени наблюдения:

$$\Delta\omega(t, T_н) = \frac{1}{T_н}\int\limits_{t-0,5T_н}^{t+0,5T_н} \Delta\omega(t)\,dt = 0.$$

Соотношение (12.1) описывает изменение частоты сигнала кварцевых и атомных генераторов. Для кварцевых генераторов $\alpha=10^{-9}\dots10^{-11}$ за сутки. Атомные генераторы имеют $\alpha=3\cdot10^{-13}$ за сутки и $\alpha=5\cdot10^{-11}$ за год [2].

Для генераторов с кварцевой стабилизацией на интервале времени наблюдения 100 ... 1 000 с с достаточной степенью точности можно считать $\omega(t)=\omega_0+\Delta\omega(t)$.

При оценке изменения частота сигнала, стабильного по частоте, различают два вида нестабильности: долговременную, связанную с систематическим смещением частоты за длительное время, и кратковременную, определяемую флюктуационными изменениями частоты сигнала.

Долговременная нестабильность частоты определяется как разность двух усредненных значений частоты, взятых в начале и конце интервала измерения $T_н$ (рис. 12.2).

$$\omega_д = \omega(t+0,5T_н,\ \tau) - \omega(t-0,5T_н,\ \tau). \quad (12.2)$$

Здесь τ — время усреднения, которое, например, для электронно-счетного частотомера равно времени счета.

При определении кратковременной нестабильности частоты исходят из предпосылок, что она связана с описа-

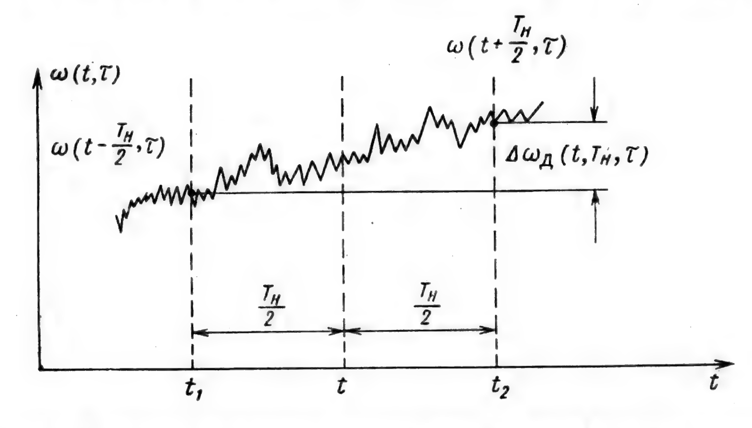


Рис. 12.2. К вопросу определения долговременной нестабильности частоты.

нием хаотических, подобных шумам эффектов:

$$\Delta\omega_{кр} = \omega(t,\ \tau) - \omega(t,\ T_н), \quad (12.3)$$

где $\omega(t,\ \tau) = \frac{1}{\tau}\int\limits_{t-\tau/2}^{t+\tau/2}\omega(t)\,dt$—усредненное значение частоты в интервале $\tau\ (\tau \ll T_н)$.

Кратковременная нестабильность частоты на 2...3 порядка выше долговременной.

Обычно для измерения кратковременной и долговременной стабильности используют стандартные интервалы усреднения: 1 г., 6 мес., 3 мес., 1 сут., 1 ч., 100 с., 1 с. и любой интервал времени, равный 10^{-n} с (n — целое положительное число).

Контроль частоты и стабильности выходного сигнала передатчика, возбудителя частоты, синхронизирующего или иного устройства, обеспечивающего выдачу высокочастотных колебаний, производится в сроки, определяемые регламентом на данную аппаратуру, а также после проведения регулировочных работ или ремонта элементов, от которых непосредственно зависит частота.

В случае ухудшения стабильности частоты следует установить причину и принять меры к ее устранению. Например, в возбудителях, имеющих в своем составе термостатированные кварцевые автогенераторы, причиной нестабильности может быть: ухудшение работы термостата, изменение режима за счет колебания питающих напряжений, нагрузки и пр., а также нарушение параметров самого кварцевого резонатора.

Высокая точность измерения частоты обеспечивается гетеродинными частотомерами, в которых используется принцип сравнения измеряемой частоты и ее гармоники с известной частотой перестраиваемого калибрационного генератора или его гармоники. В них используются различные методы индикации сравниваемых частот, например, нулевых биений, интерполяционный и т. д.

Относительная погрешность измерения современных гетеродинных частотомеров в диапазоне высоких частот достигает $\pm 0{,}5 \cdot 10^{-6}$, а чувствительность от десятых долей до десятков мкВт.

Следует иметь в виду, что почти все гетеродинные волномеры требуют большого времени прогрева. В ряде случаев это время составляет 1 ... 1,5 ч. Кроме того, в диапазоне высоких частот их собственная частота зависит от характера нагрузки. Поэтому при точных измерениях необходимо, чтобы частотомер был слабо связан с источником колебаний.

В практике частотных измерений широкое применение находят электронно-счетные частотомеры (ЭСЧ). Они выдают результаты измерений в цифровой форме, что облегчает процесс измерения и повышает точность. Кроме частоты, ЭСЧ (табл. 12.4) измеряют: периоды электрических колебаний, интервалы времени, отношение частот; осуществляют счет электрических колебаний; выдают напряжение кварцованных частот и информацию на регистрирующие устройства. Однако следует иметь в виду, что ЭСЧ могут быть использованы только для измерения частоты непрерывных (монохроматических) сигналов.

Для расширения диапазона измеряемых частот, повышения чувствительности, разрешающей способности ЭСЧ комплектуются с усилителями, преобразователями компараторами и другими блоками. Так, например, с помощью пяти сменных блоков диапазон измеряемых частот ЭСЧ типа Ч3-38 и Ч3-39 расширяется до 70 ГГц. Частотомеры, предназначенные для работы со сменными блоками, обеспечивают широкие возможности в измерении и делают их универсальными приборами.

Высокие требования предъявляются к передатчику и в подавлении побочных излучений. Под побочными излучениями понимаются излучения высокочастотных колебаний на частоте или частотах, расположенных за пределами необходимой полосы. К побочным излучениям относятся излучения на гармониках, а также все виды паразитных излучений и составляющие взаимной модуляции.

Таблица 12.4

Электронно-счетные частотомеры [28]

Тип прибора	Диапазон измеряемых частот, МГц	Суточная нестабильность частоты кварцевого генератора, $\times 10^{-9}$	Выдаваемые частоты, МГц	Величина выходного синусоидального сигнала, В
Ч3-24	10^{-5}...50	10	1; 10	0,1...100
Ч3-36	10^{-5}...50	10	5; 10	0,1...10
Ч3-39	10^{-5}...100	5	5; 100	0,1...100
Ч3-41	10^{-5}...200	10	5; 10	0,1...20

Примечание. Величина импульсного сигнала, выдаваемого прибором Ч3-36, составляет 0,5...10 В

Обычно в технических условиях на данный передатчик задается допустимый уровень побочных излучений, который определяется диапазоном частот, величиной мощности передатчика и т. д. Средняя мощность побочных излучений на гармониках, поступающих к антенне для передатчиков мощностью менее 0,5 кВт должна быть менее, чем на 40 дБ ниже уровня средней мощности на рабочей частоте, а для передатчиков мощностью 0,5 ... 50 кВт не должна превышать 50 МВт [21].

Контроль мощности побочных излучений можно осуществлять с помощью анализаторов спектра (см. далее табл. 12.6). Эти приборы дают возможность непосредственно видеть на индикаторе одновременно все частоты, излучаемые передатчиком, а также наблюдать за их изменением.

Если мощность побочных излучений окажется выше допустимых норм, следует принять меры к их подавлению. Причиной таких излучений может быть: расстройка колебательной системы выходного каскада, нарушение режима его работы, ухудшение работы фильтрующих элементов и т. д.

12.5. ПРОВЕРКА ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Электроакустические свойства передатчика характеризуются коэффициентом (при АМ) или индексом (при ЧМ) модуляции, коэффициентом нелинейных искажений, частотной характеристикой, а также уровнем паразитной модуляции и шума.

При амплитудной модуляции коэффициент глубины модуляции определяет степень изменения амплитуды высокочастотных колебаний во времени. Он записывается в виде

$$m_A = (U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}})/(U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}}),$$

где $U_{\text{макс}}$ и $U_{\text{мин}}$ — максимальное и минимальное значение амплитуды высокочастотных колебаний.

Частотная модуляция характеризуется индексом модуляции, который определяется выражением

$$m\Omega = \Delta\omega/\Omega_{\text{мод}},$$

где $\Delta\omega$ — девиация частоты (величина частотного отклонения); $\Omega_{\text{мод}}$ — модулирующая частота.

Для контроля параметров сигналов с частотной и амплитудной модуляцией в трактах радиосвязи, звукового сопровождения телевидения, телеметрических систем, радионавигации, радиолокации могут быть использованы комплекты измерителей модуляции (табл. 12.5).

Таблица 12.5

Измерители модуляции [28]

Тип прибора	Режим измерения	Диапазон рабочих частот		Диапазон измерения модуляции		Коэффициент нелинейных искажений, %
		несущих, МГц	модулирующих, кГц	кГц	%	
СК3-39	ЧМ	0,1...60	0,03...20	$0,5\cdot10^{-3}$...20	—	2...4
	АМ	0,1...60	0,03...20	—	0,1...100	0,3...1
СК3-40	ЧМ	4...1000	0,03...200	до 500	—	0,5...2
	АМ	4...500	0,03...200	—	0,1...100	0,3...1
СК3-41	ЧМ	10...1000	0,03...200	до 1000	—	0,5...2
	АМ	10...500	0,03...200	—	0,1...100	0,3...1

В качестве причин уменьшения глубины модуляции может быть: снижение усиления в каскадах модулятора, нарушение режима работы модулируемого каскада и др.

В ряде случаев снимают амплитудную и частотную модуляционные характеристики. Амплитудная модуляционная характеристика (рис. 12,3,*а*) представляет собой зависимость коэффициента глубины

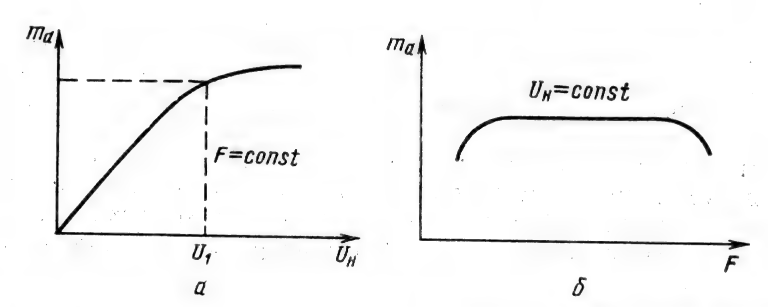


Рис. 12.3. Амплитудная (*а*) и частотная (*б*) модуляционные характеристики.

модуляции (при АМ) или величины девиации частоты (при ЧМ) от напряжения на входе модулятора при постоянном значении модулирующей частоты.

В качестве частоты модуляции выбирается одна из модулирующих частот, обычно средняя. Амплитудная характеристика в диапазонном передатчике снимается на двух-трех частотах каждого диапазона.

Величина напряжения модулирующей частоты изменяется в соответствии с требованиями технических условий до получения 100%-ной модуляции.

По результатам измерений строится график, на котором по оси абсцисс откладывается значение напряжения модулирующей частоты, а по оси ординат — коэффициент глубины модуляции.

По амплитудной характеристике (рис. 12.3,*а*) можно установить коэффициент модуляции, при котором начинаются нелинейные искажения.

Частотная характеристика обычно снимается на крайних точках диапазона в следующем порядке: передатчик в режиме модуляции настраивается на полную мощность; изменяя частоты модуляции в соответствии со значениями, имеющимися в передатчике, измеряют коэффициент модуляции, поддерживая напряжение модулирующей частоты на входе модулятора постоянным; по полученным значениям строится частотная характеристика (рис. 12.3,*б*). При этом по оси абсцисс откладывается частота в логарифмическом масштабе, а по оси ординат — коэффициент глубины модуляции.

Если в технических условиях задается неравномерность частотной характеристики в децибелах, то по оси ординат следует откладывать относительное значение коэффициента глубины модуляции. Тогда неравномерность частотной характеристики определяется по формулам [24]:

для амплитудной модуляции $M_{\text{ам}}=20\lg(m_{\text{а}}/m_{\text{аср}})$;

для частотной модуляции $M_{\text{чм}}=20\lg(m_f/m_{f\text{ср}})$, где $m_{\text{а}}$ и $m_{\text{аср}}$ — коэффициенты глубины модуляции на измеряемой и средней частотах; m_f и $m_{f\,\text{ср}}$ — девиация частоты на измеряемой и средней частотах.

О величине нелинейных искажений можно судить по амплитудной модуляционной характеристике передатчика. Нелинейные искажения тем больше, чем сильнее форма амплитудной характеристики отличается от прямолинейной.

Качественно нелинейные искажения могут быть оценены путем непосредственного сопоставления осциллограмм модулирующего напряжения и огибающей высокочастотного колебания в антенне.

Количественно нелинейные искажения оцениваются коэффициентом нелинейных искажений, который определяется в процентах и выражается через отношение среднеквадратического напряжения гармоник низкой частоты и продетектированного колебания к эффективному значению напряжения основной частоты при модуляции передатчика синусоидальным напряжением

$$K_{\text{ни}} = 100\% \left(\sum_{n=2}^{\infty} U^2{}_n\right)^{1/2} / U_1. \qquad (12.4)$$

Для измерения коэффициента нелинейных искажений используются измерители, например, С6-1А или анализатор гармоник С5-2. Измерители нелинейных искажений дают непосредственный отсчет коэффициента, анализаторы гармоник измеряют поочередно напряжения основной частоты U_1 и напряжения ее гармоник: U_2, U_3 и т. д. Коэффициент нелинейных искажений подсчитывается по формуле (12.4).

Комплексное исследование сигналов с амплитудной или частотной модуляцией может быть осуществлено с помощью анализатора спектра (см. § 12.6).

12.6. ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ СВЧ

Основными параметрами импульсных радиопередатчиков являются: колебательная мощность и частота излучаемого сигнала, длительность и форма импульсов, частота следования импульсов, форма спектра сиг-

нала. Измерение указанных параметров должно производиться на передатчике с согласованным высокочастотным трактом. Если нагрузка, имеющая в общем случае комплексный характер $Z_н=R_н+jX_н$, присоединяется к генератору СВЧ через отрезок линии с волновым сопротивлением ρ (рис. 12.4), то полное согласование генератора с нагрузкой обеспечивается с помощью двух согласующих элементов. Первым достигается согласование генератора с линией $R_г=\rho$; а вторым — линии с нагрузкой $X_н=0$; $R_н=\rho$. При неполном согласовании генератора с нагрузкой часть энергии будет отражаться от нагрузки. Проверка согласования тракта передачи энергии требованиям технических условий сводится к измерению КСВ. Для измерения КСВ широко используются рефлектометры [6]. Они включаются в высокочастотный тракт между

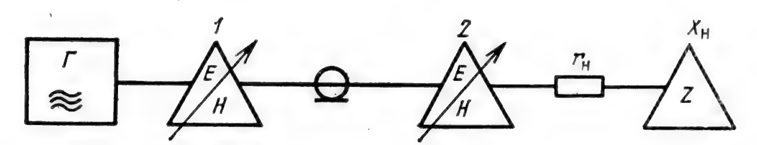


Рис. 12.4. Схема согласования нагрузки с генератором.

генератором СВЧ и нагрузкой. Показания приборов не зависят от места связи с волноводом или фидером. Они дают непосредственный отсчет КСВ и не требуют сложных операций при измерении.

Измерение рабочей частоты и частоты следования импульсов. Частота колебаний импульсного передатчика на магнетроне или клистроне при установившемся режиме поддерживается с точностью примерно $\pm 10^{-3}$. Для периодического контроля частоты используются резонансные, гетеродинные частотомеры и радар-тестеры. Комплект резонансных волноводных частотомеров Ч2-31, Ч2-32, Ч2-33 [27] позволяет измерить непрерывные и импульсно-модулированные колебания в диапазоне 7 000—16 600 МГц с погрешностью $\pm 5\cdot 10^{-4}$.

Комплект коаксиальных резонансных частотомеров Ч2-9А, Ч2-35А, Ч2-36А, Ч2-37А [28] с 50-омным высокочастотным трактом обеспечивает измерение частоты тех же колебаний в диапазоне 1 765...10 700 МГц с точностью $\pm 5\cdot 10^{-4}$. Гетеродинные частотомеры обеспечивают измерение с более высокой точностью.

Измерение частоты следует производить после установления в передатчике теплового и электрического режима. Для предотвращения перегорания диода в детекторной секции перед началом измерений связь резонансного частотомера с передатчиком должна быть установлена минимальной, а в процессе измерения доведена до оптимальной.

В автоматических системах контроля частоты СВЧ диапазона применяются датчики с ферритовыми резонаторами. Чувствительность подобных датчиков [10] составляет от 10^{-5} до 10^{-7} Вт, а относительная погрешность в определении частоты порядка $2{,}5\cdot 10^{-5}$.

Проверка частоты следования импульсов производится по функциональной схеме, приведенной на рис. 12.5,*а*. На горизонтальные пластины осциллографа подается напряжение от звукового генератора. На вертикальные пластины подаются выходные импульсы с подмодулятора (с частотой следования $F_н$). Плавно изменяя частоту звукового генератора до получения устойчивого положения импульсов на экране осциллографа, определяют частоту следования импульсов по шкале звуково-

го генератора. Во избежании ошибки проверка производится при разных соотношениях частоты следования и частоты звукового генератора. На рис. 12.5,б показаны осциллограммы наблюдения при соотношениях частот $F_{зг}=F_н$, $F_{зг}={}^1/_2F_н$, $F_{зг}={}^1/_3F_н$.

Определение мощности в импульсе. Измерение мощности СВЧ колебаний производится при согласованной нагрузке и заданном значении

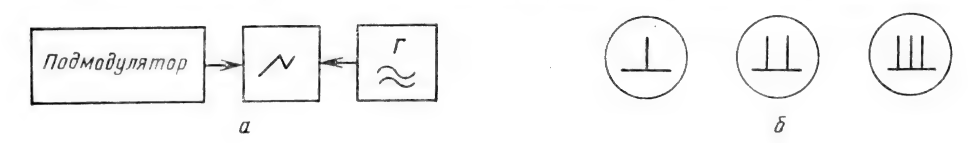


Рис. 12.5. Функциональная схема определения частоты следования импульсов (а), изображение частоты следования импульсов на экране осциллографа (б).

КСВ, обычно не более 1,3. В ряде случаев непосредственно измерение мощности в импульсе невозможно. Поэтому при измерениях определяют среднюю мощность, а затем вычисляют мощность передатчика в импульсе.

Средняя мощность передатчика связана с импульсной следующим образом:

$$P_{ср}=\frac{1}{T}\int\limits_{-T/2}^{T/2} p_i(t)\,dt, \quad \text{или} \quad P_{ср}=P_и\tau F_н,$$

$p_i(t)$ — мгновенное значение мощности; T — период следования импульсов; $P_и$ — мощность в импульсе усредненная за время, равное длительности импульса; τ — длительность импульса.

Измерение среднего значения мощности передатчика можно производить с помощью измерителей поглощающего типа, подключаемых непосредственно к выходному каскаду. Для измерения больших значений проходящей мощности при работе с реальной нагрузкой следует использовать направленные ответвители.

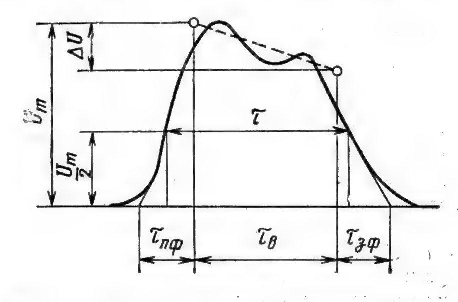


Рис. 12.6. Форма модулирующего импульса.

Проверка формы и длительности радиоимпульса. Форма и длительность радиоимпульсов передатчика определяются формой и длительностью модулирующих видеоимпульсов и временем установления (спадания) амплитуды высокочастотных колебаний в генераторе СВЧ.

Для характеристики импульса вводят понятие аппроксимирующего импульса, отсчитываемого на высоте, равной половине средней амплитуды (рис. 12.6).

Оценка формы импульса производится по следующим показателям:

— относительной длительности переднего фронта $\tau_{пф}/\tau$;

— относительной длительности заднего фронта $\tau_{зф}/\tau$;

— относительной длительности вершины $\tau_в/\tau$;

— относительному снижению напряжения на вершине импульса $h_в=\Delta U/U$.

Степень приближения реальной формы импульса к идеально прямоугольной оценивается коэффициентами формы импульса — относительной длительностью его фронтов $h_{ср} = (\tau_{пф} + \tau_{зф})/\tau$ и относительным снижением напряжения на вершине импульса. На практике форма импульса считается удовлетворительной, если $h_{ср} \leqslant 0{,}2 \ldots 0{,}4$, а $h_в \leqslant 0{,}01 \ldots \ldots 0{,}05$.

Наиболее точно величины, характеризующие импульсно-модулированные колебания, измеряются осциллографическим методом. Осциллографические методы позволяют непосредственно наблюдать высокочастотные импульсные сигналы на частотах до 300 ... 400 МГц.

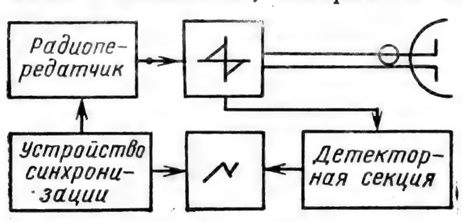


Рис. 12.7. Измерения параметров импульсно-модулированных колебаний.

Необходимость тщательной экранировки подводящих проводов, зависимость чувствительности трубки от частоты и низкий входной импеданс ограничивают применение осциллографов для непосредственного исследования высокочастотных сигналов. Поэтому с помощью осциллографов исследуются огибающие модулированных колебаний, полученных в результате детектирования.

Функциональная схема для измерения параметров импульсно-модулированных колебаний показана на рис. 12.7. Высокочастотная детекторная секция связывается с передающей линией посредством направленного ответвителя или аттенюатора, обеспечивающих ее защиту от перегрузок. Детектор, используемый в секции, должен иметь линейную характеристику, а осциллограф — ждущую развертку .

На вертикальные пластины осциллографа подается огибающая продетектированного напряжения высокой частоты. Усилитель вертикального отклонения осциллографа должен обеспечивать полосу пропускания не менее $1/\tau$, иначе форма импульса будет искажена. Если время развертки меньше периода следования импульсов, то импульсы будут воспроизводиться на экране осциллографа и будут удобны для наблюдения. При наличии калиброванных временных меток на развертке можно отсчитать длительность импульса.

Измерение энергетического спектра радиоимпульса. Как известно, высокочастотный импульс можно представить в виде ряда гармонических составляющих. Структура спектра высокочастотных колебаний определяется длительностью и периодом следования импульсов, их формой и частотой генерируемых колебаний во время импульса. В большинстве практических случаев длительность импульсов значительно меньше периода их следования T. В этом случае для прямоугольных импульсов длительностью τ при частоте колебаний ω_0 энергетический спектр частот выражается формулой

$$P(\omega) = \frac{\sin^2[\pi\tau(\omega - \omega_0)]}{[\pi\tau(\omega - \omega_0)]^2}. \qquad (12.5)$$

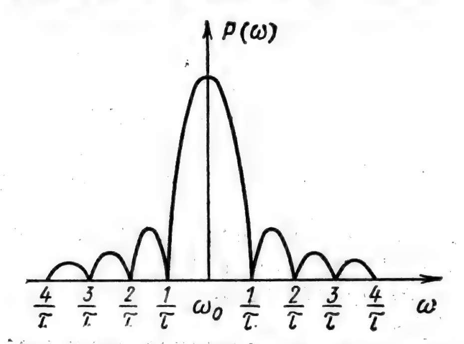


Рис. 12.8. Энергетический спектр высокочастотный импульс можно представить

График этого спектра показан на рис. 12.8. Как видно из этого рисунка, ширина основного лепестка спектра — разность частот между минимумами прямоугольных импульсов — равна $\Delta\omega = 2/\tau$.

Относительное распределение энергии импульса по частоте определяется с помощью анализаторов спектра, которые используются также в тех случаях, когда требуется просто определить наличие каких-то колебаний на частотах, отличающихся от рабочей частоты передатчика, а также отношение амплитуды этих колебаний к амплитуде колебаний на рабочей частоте. Анализаторы спектра (табл. 12.6) обеспечивают

Таблица 12.6

Анализаторы спектра [28]

Тип прибора	Диапазон рабочих частот, МГц	Полоса обзора на экране индикатора, МГц	Максимальная чувствительность, мкВ	Погрешность измерения или установка частотного интервала
С4-45	10...100	0,1...90 0,1...90	35	$0,1F+П$
С4-49	10...2000	0,1...10	100	$0,1F+П$
С4-50	10...39600	3...10	50	15%

Примечание. F — полоса обзора, П — полоса пропускания; все приборы имеют входное сопротивление 50 Ом.

широкие возможности для наблюдения за спектром и измерения его характеристик. Так, например, анализатор спектра типа С4-50 предназначен для наблюдения и относительного измерения спектров радиоимпульсов и непрерывных сигналов в реальном масштабе времени в широком диапазоне частот.

Подключение анализатора спектра к радиопередающему устройству аналогично подключению измерителя мощности (рис. 12.1). Анализаторы спектра в большинстве случаев имеют коаксиальные входы (табл. 12.6). Если направленный ответвитель имеет волноводный выход, то для согласования используется коаксиально-волноводный переход (КВП).

Причиной искажения спектра импульсов может служить нарушение в работе СВЧ прибора или модулятора. Известно, например, что перескок частоты магнетрона приводит к образованию двух максимумов в спектральной характеристике; размытость спектра свидетельствует об изменении формы модулирующего импульса, а причиной пропуска импульсов может являться: повышение крутизны фронта импульсов, недостаточная его амплитуда или пропуск импульсов подмодулятором.

12.7. ПРОВЕРКА ЦЕПЕЙ УПРАВЛЕНИЯ, БЛОКИРОВКИ И СИГНАЛИЗАЦИИ

Цепи управления, блокировки и сигнализации (УБС) предназначены для обеспечения определенной последовательности включения и выключения передатчика, контроля режимов работы важнейших узлов и источников питания, обеспечения безопасности обслуживающего персонала. Степень их сложности и совершенства зависит от назначения, типа, величины мощности передатчика, от сопряжения его с другой аппаратурой комплекса.

Наиболее развитой системой автоматизации, включающей в себя также телеуправление, телесигнализацию, телеконтроль и регулирующий режим в заданных пределах, обладают автоматизированные передатчики, предназначенные для работы без операторов.

Заключение об исправности цепей УБС выносится на основании проверок работы следующих основных систем:

— охлаждения и терморегулирования;

— включения источников питания;

— настройки передатчика;

— защиты от перегрузок и аварийного выключения питания при выходе из строя передатчика;

— включения резервных блоков и элементов;

— проверки цепей защиты, блокировки, сигнализации и др.

Для устранения перегрева генераторных ламп и других элементов передатчика часто применяется принудительное воздушное или жидкостное охлаждение, которое должно включаться в работу раньше подачи напряжения питания. При испытании системы охлаждения проверяется: отсутствие вибраций при работе вентиляторов, объем воздуха, протекающего через воздухопровод, его температура и т. д.

Для поочередного включения (выключения) источников питания или других блоков и элементов широко используются «реле времени». О нормальной работе «реле времени» судят по секундомеру при многократном включении и выключении аппаратуры. При этом момент включения или выключения соответствующих элементов аппаратуры должен регистрироваться по сигнальным и индикаторным лампочкам или измерительным приборам.

В различных передатчиках по-разному осуществляется настройка на заданную частоту. Широкое распространение получил метод, при котором значение частоты (номер волны) указывается на цифровом табло. При проверке следует сопоставить фактическое значение частоты передатчика со значением, засвеченным на табло. В ряде передатчиков имеется система дистанционной перестройки с одной частоты на другую в пределах рабочего диапазона. При проверке такой системы следует также сопоставить фактическое значение частоты передатчика со значением, установленным на пульте дистанционного управления.

Система настройки передатчика включает различные измерительные приборы, установленные в высокочастотных, низкочастотных цепях и цепях постоянного тока. Проверка этих приборов заключается в сравнении их показаний с показаниями образцовых приборов.

Система защиты от перегрузок должна обеспечить быстрое и автоматическое отключение поврежденного блока или передатчика в целом от питающей сети, а в случае нарушения нормального режима работы давать предупредительные сигналы. Исправность системы защиты цепей питания от перегрузок определяется проверкой исправности самих цепей и индикации.

Проверка системы включения резервных блоков осуществляется созданием предпосылок для такого включения. Исправность цепей блокировки производится проверкой выключения питания при нарушении блокировочных контактов: снятии кожуха, открытии дверок в отсеке, выдвижении какого-либо блока и т. д.

Глава 13

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА

13.1. ПАРАМЕТРЫ АНТЕНН И ФИДЕРНЫХ ЛИНИЙ, ПОДЛЕЖАЩИЕ КОНТРОЛЮ

Параметры, характеризующие антенну, объединяются в две группы [47]. К первой относятся параметры, связанные с энергией переменных токов высокой частоты: входное сопротивление, резонансные частоты, частотная характеристика, полоса пропускания и т. п. Ко второй группе относятся параметры, связанные с энергией в виде электромагнитного излучения (характеристики излучения): диаграмма направленности, ширина главного лепестка, относительный уровень побочных максимумов, коэффициент усиления, коэффициент направленного действия, эффективная площадь, действующая высота и т. п.

Обе группы параметров характеризуют работу в равной мере как передающих, так и приемных антенн устройств.

Некоторые параметры при эксплуатации антенн определяются путем непосредственных измерений, эти параметры называются первичными. Остальные параметры, называемые вторичными, находятся графически или расчетным путем по измеренным первичным. В первой группе параметров первичным является входное сопротивление, а во второй — диаграмма направленности и коэффициент усиления.

Связь антенны с передающей и приемной аппаратурой осуществляется при помощи фидерных линий. К числу основных параметров, характеризующих фидерные линии, относятся: волновое сопротивление, коэффициент затухания и коэффициент скорости.

Фидерные линии как линии передачи энергии имеют в своем составе различного рода переходы, фланцевые соединения, изгибы и т. д. Все эти элементы в значительной степени влияют на характеристики антенно-волноводного тракта и могут ухудшать их. Поэтому конструкцией и схемой высокочастотного тракта, конструкцией антенн предусматривается возможность согласования элементов друг с другом для получения необходимых выходных характеристик. В ряде случаев приходится подстраивать не только элементы фидерных линий, но и антенны. Антенны, находящиеся в эксплуатации, с течением времени подвергаются деформациям, приводящим к изменению их параметров. Поэтому правилами эксплуатации предусматривается проведение периодических контрольных измерений параметров антенн, их регулировка и настройка соответственно результатам измерений.

13.2. ПРОВЕРКА ПАРАМЕТРОВ АНТЕНН

Измерение входного сопротивления антенн. Для определения входного сопротивления антенн на частотах от самых низких до десятков тысяч мегагерц используются мостовые схемы, по которым изготавливается специальная аппаратура (мосты). Мостовые методы измерения входного сопротивления обеспечивают высокую точность измерений, а в ряде случаев они более просты и более удобны, чем другие методы измерений.

В диапазоне СВЧ для определения входного сопротивления антенн обычно используются измерительные линии [22, 24, 32, 47]. На сантиметровых волнах питание антенны, как правило, осуществляется полыми волноводами и при измерениях используются волноводные измерительные линии. В тех случаях, когда применяются полосковые линии, измерения целесообразно производить при помощи полосковой измерительной линии. На дециметровых волнах применяются преимущественно коаксиальные фидеры и соответственно коаксиальные измерительные линии, которые имеют коаксиальные переходы и приспособлены для присоединения к коаксиальному фидеру. Методика определения вход-

ного сопротивления антенны при помощи измерительных линий предусматривает следующие операции:

— снятие кривой распределения напряжения вдоль фидера измерительной линии (рис. 13.1);

— нахождение по снятой кривой коэффициента бегущей волны $K_{бв}$ и координаты точки минимума напряжения x_{01};

— расчет входного сопротивления по полярным диаграммам сопротивлений или по формуле

$$Z_x = \rho \frac{K_{бв} + 0{,}5j\,(1 - K^2_{бв}) \sin 2m_1 x_1}{\cos^2 m_1 x_1 + K^2_{бв} \sin^2 m_1 x_1}, \tag{13.1}$$

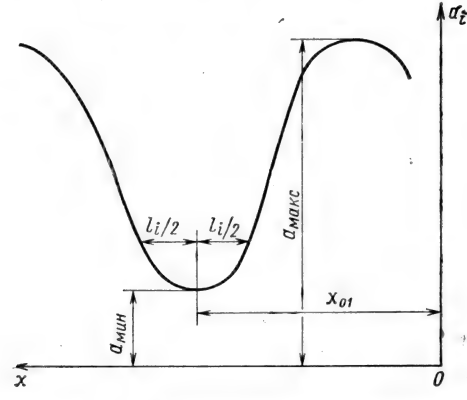


Рис. 13.1. К определению коэффициента бегущей волны по кривой напряжения на фидере измерительной линии.

где ρ — волновое сопротивление фидера, питающего антенну; m_1 — коэффициент фазы, равный $2\pi/\lambda$; λ — длина волны; x_1 — координата, отсчитываемая от сечения фидера, в котором имеется минимум напряжения в сторону передатчика ($x_1 = x - x_{01}$).

Согласно уравнению (13.1) искомое входное сопротивление антенны Z_A, являющееся функцией параметров $K_{бв}$ и x_{01}, определяемых при помощи измерительной линии (нагрузка имеет координату $x=0$, $x_1 = -x_{01}$), равно

$$Z_A = R_A + jX_A = \rho \frac{K_{бв} - 0{,}5j\,(1 - K^2_{бв}) \sin 2m_1 x_{01}}{K^2_{бв} \sin^2 m_1 x_{01} + \cos^2 m_1 x_{01}}.$$

На рис. 13.1 представлен примерный вид результатов данных измерений. По оси абсцисс отложены координаты x положения индикаторной головки на фидере измерительной линии, отмеченные по масштабной линейке, а по оси ординат — показания a_i прибора индикаторной головки. По данным измерений вычерчена зависимость a_i от x. По кривой определяется коэффициент бегущей волны

$$K_{бв} = U(a_{мин})/U(a_{макс}),$$

где $U(a_{макс})$ и $U(a_{мин})$ — относительные значения напряжения в точках максимума и минимума, определяемые по градуировочной кривой детектора измерительной линии.

Для того, чтобы найти точку x_{01} минимума напряжения, следует на графике распределения напряжения в области минимума провести несколько хорд, параллельных оси абсцисс (рис. 13.1). Средние точки хорд дают координату x_{01}. Если разным хордам соответствуют разные значения x_{01}, то их усредняют. Разброс данных служит критерием точности измерений.

При сравнительно малом $K_{бв}$ ($K_{бв} < 0{,}25$) не удается снять кривую распределения напряжения из-за квадратичной характеристики детектора, так как при этом мало отношение $a_{мин}/a_{макс}$. Достаточно точная величина $K_{бв}$ в этих условиях получается различными способами. Допустимо ограничиться снятием небольшого участка кривой в области минимума или максимума (рис. 13.1). Затем на графике провести несколько хорд, параллельных оси абсцисс, и по длине хорды l_i, а также по значению a_i (по соответствующему ему значению U_i), на уровне которого проведена хорда, вычислить $K_{бв}$ (i — номер хорды) по формулам

$$K_{бв} = (U^2_i/U^2_{мин} - \cos^2 m_1 l_i/2)^{-1/2} \times \sin m_1 l_i/2$$

или

$$K_{бв} = \sqrt{U^2_i/U^2_{макс} - \cos^2 0{,}5 m_1 l_i} / \sin 0{,}5 m_1 l_i$$

в зависимости от того, производятся измерения в области минимума или мак-

симума напряжения. Здесь $U_{мин}$, $U_{макс}$ — относительные величины напряжения, определяемые по градуировочной кривой детектора соответственно в точках минимума или максимума напряжения.

При квадратичной характеристике детектора можно воспользоваться непосредственно показаниями прибора a_i, $a_{мин}$, $a_{макс}$ индикаторной головки и по ним определить $K_{бв}$

$$K_{бв} = (a_i/a_{мин} - \cos^2 m_1 l_i/2)^{-1/2} \times \sin m_1 l_i/2$$

или

$$K_{бв} = \sqrt{a_i/a_{мин} - \cos^2 0,5\, m_1 l_i} / \sin 0,5\, m_1 l_i$$

В диапазоне дециметровых и сантиметровых волн измерительная линия весьма часто отделяется от антенны длинным фидером, имеющим повороты, сочленения и другие элементы, затрудняющие определение электрической длины фидера. В этих случаях измерения дают входное сопротивление всей антенно-фидерной системы в целом. Представление о входном сопротивлении антенны без фидера можно получить следующим образом. Отсоединив антенну, фидер замыкают накоротко в точке его прежнего соединения с антенной или включают в эту точку фидера активное сопротивление, меньшее его волнового сопротивления. Затем снимают распределение напряжения на измерительной линии. Если фидер однороден и искажения поля, вносимые поворотами, сочленениями и другими элементами, невелики, то можно считать, что точка минимума напряжения на измерительной линии отстоит от точки соединения фидера и антенны на расстоянии целого числа полуволн, т. е. эти точки минимума напряжения можно принять за точки присоединения антенны к измерительной линии.

В эксплуатационных условиях для определения коэффициента бегущей волны удобно пользоваться рефлектометрами, представляющими собой сочетание двух направленных ответвителей в одной конструкции, один из которых реагирует на падающую волну, а второй — на отраженную. Такие рефлектометры обеспечивают определение модуля коэффициента отражения $K_{от}$, зная который, легко вычислить коэффициент бегущей волны

$$K_{бв} = (1 - K_{от})/(1 + K_{от}).$$

В качестве примеров рефлектометров могут быть названы коаксиальные измерители Р2-1 и Р2-2, работающие соответственно в диапазонах частот 30...1000 МГц и 1...3,5 ГГц, а также волноводный измеритель Р2-22 в диапазоне частот 7,15...10,2 ГГц.

С целью ускорения процесса настройки и уменьшения трудоемкости измерений для определения входного сопротивления антенн применяются автоматические измерители, в частности, панорамные измерительные устройства [22]. К подобным устройствам относятся полуавтоматические измерители, позволяющие визуально наблюдать картину изменения определяемых характеристик в широком диапазоне частот. Наибольшее распространение получили панорамные измерители коэффициента стоячей волны (КСВ) и полных сопротивлений антенн, объемных резонаторов, переходов и т. п. (панорамные измерители КСВ и рефлектометры).

При использовании панорамного измерителя КСВ на экране осциллографа наблюдается панорама изменения КСВ в требуемом диапазоне частот и значения КСВ отсчитываются на любой частоте рабочего диапазона. Примерами панорамных измерителей могут служить автомати-

ческие волноводные измерители КСВ типов Р2-18...Р2-23, охватывающие диапазон частот 2,6...10,2 ГГц и позволяющие измерять КСВ от 1,05 до 10 при полосе качания 100...1900 МГц, с погрешностью измерения $\leqslant 5\%$ (для КСВ 1,05...1,5).

Панорамный измеритель полных сопротивлений дает возможность определить с помощью полярных диаграмм сопротивлений и координатных линий КСВ, фазу и модуль коэффициента отражения.

Панорама коэффициента отражения при использовании такого прибора наблюдается на установленном перед экраном электронно-лучевой трубки прозрачном диске с нанесенным на его поверхность графиком полярной диаграммы сопротивлений.

Для определения значений модуля и фазы полного сопротивления на определенной частоте используются вспомогательные светящиеся координатная окружность и диаметральная линия. При установке значения частоты, при которой необходимо определить полное сопротивление, на экране электронно-лучевой трубки получается светящаяся точка (яркостная метка). Положение этой светящейся точки зависит от величин модуля и фазы коэффициента отражения. Изменением с помощью регулировочного потенциометра радиуса координатной окружности до ее совпадения с полученной точкой по лимбу потенциометра определяется КСВ или $K_{от}$. Затем, вращая координатный диаметр, совмещают его с яркостной меткой и по лимбу органа регулировки отсчитывают фазу.

Подобные приборы выгодно отличаются от измерительных линий и обычных рефлектометров большой скоростью и удобством измерений, возможностью измерения полных сопротивлений, быстро меняющихся во времени и являющихся функцией частоты.

Снятие диаграммы направленности антенн. Диаграмму направленности антенн, как правило, снимают в двух взаимно перпендикулярных плоскостях — горизонтальной и вертикальной, при этом антенна используется в режиме передачи или приема.

Участок местности, в пределах которого производятся операции по снятию диаграммы направленности, не должен иметь воздушных линий электропередач, линий связи, металлических конструкций, зданий и т. п.

Снять диаграмму направленности антенны можно двумя методами: методом неподвижной антенны или методом вращающейся антенны.

Если антенна работает на излучение, то при первом методе она неподвижна и вокруг нее по кругу перемещается индикатор поля со вспомогательной антенной, показывающий величину напряженности поля в разных точках круга. При втором методе антенна вращается вокруг своей оси, а индикатор поля со вспомогательной антенной неподвижен и показывает величину напряженности поля в зависимости от угла поворота антенны.

Если антенна работает на прием, то при первом методе она неподвижна и вокруг нее по кругу перемещается хорошо стабилизированный и работающий на соответствующей частоте генератор со вспомогательной антенной. Прибор основной антенны в этом случае показывает зависимость величины э. д. с. от положения излучателя на круге. При втором методе антенна вращается вокруг своей оси, а излучатель со вспомогательной антенной неподвижен. Прибор основной антенны показывает зависимость величины э. д. с. от угла поворота антенны.

Снять диаграмму направленности антенн можно как наземными измерениями, так и измерениями с летательных аппаратов.

Наземные измерения обычно ограничиваются лишь пределами главного лепестка диаграммы направленности. Предварительно, при помощи геодезических инструментов, например, теодолита, намечается ряд азимутов в пределах предполагаемого сектора измерений и на азимутальных направлениях проводится разметка пунктов измерений, кото-

рые располагаются на одинаковых расстояниях l от центра антенны, причем l удовлетворяет условию $l>l_{мин}$. Обходя антенну по кругу, производят измерения в намеченных пунктах.

Диаграмма направленности антенны является характеристикой, не зависящей от расстояния. Однако это справедливо лишь для очень больших расстояний от антенны, строго говоря, на бесконечно больших. Для каждого типа антенны в зависимости от длины волны и требуемой точности измерений существует минимальное расстояние $l_{мин}$, на котором слабо проявляется влияние расстояния на форму диаграммы направленности. Измерения на расстояниях, меньших $l_{мин}$, могут привести к ошибочному результату. Минимально допустимое расстояние $l_{мин}$, если принять, что ошибка в определении напряженности поля не должна превышать 1% [32, 47], вычисляется по формуле

$$l_{мин} \geqslant \vartheta d^2/\lambda, \qquad (13.2)$$

где d — максимальный линейный размер антенны; ϑ — коэффициент, зависящий от формы антенны и изменяющийся от 2 до 4; λ — длина волны.

Наземные измерения обладают следующими существенными недостатками:

— позволяют получать диаграммы направленности лишь в одной плоскости, причем, как правило, в нехарактерной, поскольку у большинства антенн главный лепесток приподнят над горизонтом;

— отличаются низкой точностью, что обусловлено неравномерностью рельефа местности и искривлением фронта волны и связанным с этим искажением поляризации уровня поля за счет влияния Земли.

Кроме того, наземные измерения весьма трудоемки и сложны. Они требуют большой подготовительной работы по выбору трассы обхода и разметке пунктов измерений. Сами измерения требуют много времени и практически не допускают автоматизации (метод вращающейся антенны позволяет применить автоматическую запись диаграммы направленности). Из-за указанных недостатков наземным измерениям диаграммы направленности отводится роль контрольных или предварительных измерений.

Использование самолетов и вертолетов для снятия диаграмм направленности позволяет произвести измерения в различных плоскостях, допускает автоматическую запись уровня поля. Поэтому измерения с использованием самолетов и вертолетов наиболее универсальны и широко используются при снятии диаграмм направленности антенн.

Комплект аппаратуры для снятия диаграмм направленности должен состоять из передающего устройства, приемного устройства, вспомогательной антенны, размещаемой на летательном аппарате, и приборов слежения за летательным аппаратом.

Для снятия диаграмм направленности передающих антенн в качестве генератора целесообразно использовать рабочий передатчик. При этом размещение приемника на летательном аппарате требует обеспечения его помехоустойчивости, тщательной амортизации его и самопишущих приборов. Задача обеспечения помехоустойчивости облегчается благодаря использованию рабочего передатчика, который создает значительные поля в месте приема. Улучшение помехоустойчивости достигается также хорошей экранировкой приемника и блокировкой его по питающим цепям.

Для снятия диаграмм направленности приемных антенн нужно иметь специальные измерительные генераторы, располагаемые на летательном аппарате. Если генератор имеет малую мощность, то приемник должен обладать высокой чувствительностью.

Система слежения за летательным аппаратом и связь показаний приборов, отмечающих напряженность поля, с координатами самолета или вертолета представляют довольно сложную задачу.

В качестве приборов, отмечающих координаты летательного аппарата, применяются теодолит, установленный вблизи антенны и служащий для определения азимута и угла места, и высотомер летательного аппарата для определения

высоты полета. Прибор, показывающий напряжение на выходе приемника (при снятии диаграмм направленности приемных антенн), помещается вблизи теодолита, при этом возможна одновременная запись углов установки теодолита и напряжения на выходе приемника. Самолет или вертолет должен летать по кругу с центром в средней точке антенны и на постоянной высоте, контролируемой по высотомеру. Кроме того, он должен оставаться все время в поле зрения теодолита.

В случае использования при измерениях скоростного самолета и при острой диаграмме направленности антенны наблюдение ведут три оператора: один наблюдает через зрительную трубу теодолита за самолетом, держа его постоянно на перекрестии нитей объектива; второй наблюдает за угловыми шкалами теодолита; третий — за прибором, показывающим напряжение на выходе приемника, или за самописцем. По сигналу второго оператора, записывающего углы, третий записывает напряжение, отмечаемое прибором, или делает метки на ленте самописца. При сравнительно широком лепестке диаграммы направленности антенны и небольшой скорости полета наблюдение ведут два или даже один оператор. В случае использования при измерениях вертолета запись углов и напряжений производится в момент кратковременного зависания вертолета. Наблюдение ведет один оператор.

При снятии диаграмм направленности передающих антенн приемная аппаратура размещается на летательном аппарате. В качестве прибора для слежения также используется теодолит. Но поскольку оператор, записывающий напряжение на выходе приемника, находится в этом случае на летательном аппарате, то должна быть обеспечена жесткая связь между ним и оператором у теодолита. Измерения проводятся следующим образом. На трассе полета намечаются наземные ориентиры, угловые координаты которых известны. Пролетая над этими ориентирами, оператор записывает напряжения на выходе приемника. Если для записи использовать самописец, то достаточно иметь два ориентира — начальный, по которому самописец включается, и конечный, по которому он выключается. Скорость полета летательного аппарата в период записи должна быть при этом строго постоянной.

Для успешного проведения измерений при помощи летательных аппаратов требуется их тщательная подготовка, и в том числе проведение предварительных поверочных измерений.

При снятии диаграмм направленности антенн важно правильно определить центр антенны, т. е. точку центра круга, по которому производится облет или обход антенны (при первом методе измерений), или точку, через которую проходит ось вращения антенны (при втором методе измерений). Особенно это имеет значение, когда расстояние, на котором производятся измерения, близко к $l_{мин}$.

Центром антенны является центр фазового фронта волны, излучаемой антенной. Он расположен в средней точке излучающей части антенны, например, у линзовых, зеркальных и рупорных антенн — примерно в центре раскрыва, у диэлектрических и спиральных антенн — в средней точке соответственно диэлектрического стержня и оси спирали. При снятии диаграмм направленности в вертикальной плоскости с учетом влияния Земли центром антенны является проекция указанной средней точки на поверхность Земли.

Диаграммы направленности антенн, как правило, многолепестковые. В пределах каждого лепестка измерения следует производить не менее, чем в 10...12 точках, причем особенно тщательно должны быть исследованы области максимума и минимума. При измерениях необходимо уделить внимание стабильности работы передатчика и градуировки приемника. В тех случаях, когда требуется точно измерить уровень максимумов боковых лепестков диаграммы направленности, следует пользоваться приемником с линейной шкалой, либо включить в цепь приемника переменный аттенюатор, при помощи которого добиваются одинаковых показаний индикатора выхода приемника.

Измерение коэффициента усиления антенн. Коэффициент усиления антенн измеряют после снятия диаграммы направленности в двух плоскостях и определения направления главного максимума. При этих измерениях антенна используется как передающая либо как приемная. Коэффициент усиления антенны проще измерить, используя антенну

в качестве передающей [47]. В этом случае антенна присоединяется к передатчику и измеряется поступающая в антенну мощность P и абсолютная величина напряженности поля излучения E в направлении главного максимума. При этом коэффициент усиления G вычисляется по формуле

$$G = E^2 l^2 / 30P,$$

где l — расстояние между антенной и местом измерений напряженности поля.

Коэффициент усиления антенны определяется путем сравнения величины сигналов этой антенны с сигналом образцовой антенны, коэффициент усиления которой известен. В диапазоне СВЧ в качестве образцовых применяют рупорные антенны, коэффициент усиления которых точно определен расчетным путем. Измерение коэффициента усиления методом сравнения производится при использовании рабочей и образцовой антенн как на прием, так и на излучение. В рассматриваемом методе обе сравниваемые антенны должны находиться точно в одинаковых условиях излучения или приема. В соответствии (13.2) на расстоянии $l > l_{\text{мин}}$ от них помещается вспомогательная аппаратура для измерений точно так же, как при снятии диаграммы направленности. При работе сравниваемых антенн на излучение аппаратура состоит из приемной антенны и индикатора, при работе их на прием — из передающей антенны и генератора, индикатор в этом случае подключается к выходу приемника, на который поступают сигналы со сравниваемых антенн.

Рассмотрим методику определения коэффициента усиления при работе сравниваемых антенн на прием. Поляризация передающей антенны должна совпадать с поляризацией сравниваемых антенн. Измерения начинаются с включения генератора и настройки его на заданную частоту. Вращением рабочей и передающей антенн добиваются максимальных показаний индикатора на выходе приемника и фиксируют показание шкалы измерительного аттенюатора. Затем рабочая антенна заменяется образцовой. С помощью аттенюатора показания индикатора на выходе приемника приводятся к значению, полученному при использовании рабочей антенны. Выходное напряжение генератора, подаваемое на передающую антенну, поддерживается все время постоянным. Коэффициент усиления рабочей антенны определяется по формуле [24]

$$G_1 = G_2 \operatorname{antilog}(a_{\text{ат}1} - a_{\text{ат}2})/10,$$

где G_1 и G_2 — коэффициенты усиления рабочей и образцовой антенн; $a_{\text{ат}1}$ и $a_{\text{ат}2}$ — показания аттенюатора при использовании соответственно с рабочей и образцовой антеннами в дБ.

При определении коэффициента усиления антенны необходимо выполнить следующие рекомендации:

1. Величина коэффициента усиления образцовой антенны должна быть того же порядка, что и величина коэффициента усиления рабочей антенны.

2. Рабочая и образцовая антенны должны устанавливаться по азимуту и углу места в положение максимальной принимаемой мощности.

3. Для получения точности измерений не хуже 5...10% следует добиваться хорошего согласования антенн с нагрузкой.

4. Если поле передающей антенны в месте установки рабочей антенны постоянно, образцовую антенну можно устанавливать рядом с рабочей на соответствующей высоте.

Когда отсутствуют или невозможно подобрать образцовые антенны, измерение коэффициента усиления производится методом двух идентичных антенн. Измерения по данному методу проводятся при помощи двух совершенно идентичных антенн (одна из них рабочая), которые располагаются на расстоянии $l > l_{\text{мин}}$ друг от друга и ориентируются таким образом, чтобы главные максимумы их диаграмм направленности были ориентированы по одной прямой навстречу друг другу. Одна из антенн работает на передачу, другая — на прием. Измеряется мощность P_1, поступающая в передающую антенну, и мощность P_2, улавливаемая приемной антенной. Усиление рабочей антенны равно

$$G = (P_2/P_1)^{1/2} 4\pi l/\lambda.$$

Измерение коэффициента усиления возможно и при использовании метода плоского экрана (отраженной волны)

[32, 47]. Методика измерений заключается в следующем:

— антенна работает в режиме передачи;

— определяется степень согласования антенны с фидером;

— производится настройка антенно-фидерной системы так, чтобы коэффициент бегущей волны на измерительной линии получился близким к единице;

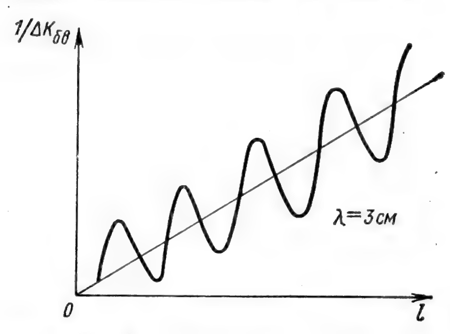


Рис. 13.2. К определению среднего значения измерения коэффициента бегущей волны.

— перед антенной на произвольном расстоянии l устанавливается плоский металлический экран, плоскость которого перпендикулярна направлению главного максимума излучения антенны, а размеры таковы, что из центра антенны экран виден под телесным углом, не меньшим телесного угла, занимаемого главным лепестком диаграммы направленности антенны;

— определяется коэффициент бегущей волны, получаемый после установки экрана, поскольку последний нарушает согласование;

— по расстройке согласования $\Delta K_{бв} = 1 - K_{бв}$ вычисляется коэффициент усиления антенны по формуле

$$G = \Delta K_{бв} 4\pi l/\lambda \qquad (13.3)$$

или

$$1/\Delta K_{бв} = 4\pi l/G\lambda.$$

Для повышения точности измерений и устранения влияния многократных отражений между антенной и экраном проводится несколько измерений коэффициента бегущей волны для разных расстояний l. Затем строится зависимость $1/\Delta K_{бв} = f(l)$ (рис. 13.2). Вычерчивая приближенную прямую, проходящую через начало системы координат, можно определить ее наклон и вычислить коэффициент усиления антенны по формуле (13.3). Учитывая при этом потери в омическом сопротивлении антенны, которые определяют ее к. п. д. η, можно вычислить действительный коэффициент усиления антенны $G_д = \eta G$.

В изложенных выше методах измерения коэффициента усиления антенны предполагалось, что антенны находятся в свободном пространстве. Из-за наличия вблизи антенн поверхности Земли между ними осуществляется дополнительная паразитная связь, которая может дать существенную погрешность при измерениях.

Для исключения влияния Земли на результаты измерения коэффициента усиления антенн одна из них, например, образцовый рупор, устанавливается на различной высоте от Земли. Зависимость показаний индикатора образцовой антенны от высоты ее установки над Землей определяется в виде периодической кривой, с помощью которой можно исключить влияние Земли на результаты измерения, используя формулу

$$U = 0{,}5(U_{макс} + U_{мин}),$$

где U — искомое показание индикатора при отсутствии влияния Земли; $U_{мин}$ и $U_{макс}$ — найденные показания в минимуме и в ближайшем к нему максимуме построенной периодической кривой.

Значения U, $U_{мин}$ и $U_{макс}$ должны быть выражены в единицах напряжения.

Другой способ исключения влияния Земли заключается в выборе такой высоты установки антенн или расстояния между ними, при которой направление отраженного от Земли луча совпадает с направлением нулевого излучения хотя бы для одной из антенн. При измерении коэффициента усиления антенны по методу плоского экрана влияние Земли менее существенно и его можно в первом приближении не учитывать.

13.3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ПАРАМЕТРОВ АНТЕНН

Наладка и эксплуатация антенн, размеры которых в десятки, сотни и даже тысячи раз превосходят длину используемой волны, представляют значительные трудности [20]. Если измерения основных параметров антенн небольших размеров сравнительно легко производятся

с помощью описанных выше методов, то при переходе к большим антеннам возникают затруднения принципиального характера, требующие применения новых методов для их проверки.

В диапазоне метровых, дециметровых и сантиметровых волн, для которых указанные затруднения особенно существенны, оказалось возможным применять в качестве вынесенных источников радиоволн естественные передатчики — внеземные (космические) источники радиоизлучения.

Через земную атмосферу к ее поверхности проходят волны, лежащие в пределах примерно 0,0125 м$<\lambda<$20 м. Во всем указанном диапазоне спектр космического излучения непрерывный и носит характер «шума». Поэтому наличие внеземных источников радиоизлучения позволяет решить трудную задачу измерения параметров антенны и определения в пространстве положения электрической оси антенны. Самым мощным источником космического радиоизлучения является Солнце. Что касается Галактики в целом, то из общего, почти равномерного фона, создаваемого ее радиоизлучением, выделяются отдельные дискретные источники (см. далее табл. 14.5).

Снятие диаграммы направленности. Измерение диаграммы направленности антенн с помощью внеземных источников радиоизлучения состоит в записи кривых прохождения этих источников через диаграмму направленности антенны. В принципе, с помощью внеземных источников радиоизлучения можно получать полную диаграмму направленности антенны: главный лепесток, первый, второй и т. д. боковые и задний лепестки диаграммы направленности.

Однако из-за недостаточной чувствительности радиометрических приемных устройств и наличия фона радиоизлучений практически удается записать лишь главный и в некоторых случаях ближайшие боковые лепестки.

Для снятия диаграммы направленности сигнал антенны подается на вход радиометрического приемника (радиометра), к выходу которого подключается самописец. На самописец подаются также метки точного времени.

Методика снятия диаграммы направленности антенны с помощью внеземного источника радиоизлучений [20] производится в следующей последовательности:

1. Выбор и определение координат внеземного источника радиоизлучений. При этом следует учитывать, что источники со склонением $\Theta<\xi-\pi/2$ всегда находятся за горизонтом и являются для данной широты ξ невосходящими, а источники, для которых $\Theta>\pi/2-\xi$, являются для данной широты незаходящими и могут наблюдаться в любое время суток.

2. Расчет времени кульминации дискретного источника радиоизлучения, т. е. времени прохождения источника через меридиан места наблюдения. При этом следует учитывать рефракцию в Земной атмосфере.

3. Ориентирование (установка) рабочей антенны по азимуту и углу места в соответствии с расчетными данными.

4. Подготовка и прогрев измерительной аппаратуры радиометрического приемника, самописца и т. д.

5. Запись прохождения внеземного источника через диаграмму направленности.

Если расчеты были правильными, то несколько ранее расчетного момента кульминации источник радиоизлучения начинает «входить» в диаграмму направленности, пересекает ее и «выходит» из диаграммы. Запись при этом имеет вид, приведенный на рис. 13.3.

В том случае, когда источник радиоизлучения считается точечным, запись его прохождения через диаграмму направленности воспроизводит эту диаграмму. Прохождение источника дает сечение диаграммы направленности антенны одной из плоскостей. Записывая прохождения источника радиоизлучения при различных углах, можно получить различные сечения диаграммы направленности антенны. Для этой цели наиболее удобным является незаходящий источник Кассиопея — *А*. Записывая

времени, составляющие 0,1...0,2 от времени прохождения источником диаграммы направленности между точками половинной мощности.

Получаемая при прохождении источника диаграмма представляет собой некоторую среднюю диаграмму для той полосы частот, в которой производится прием. Если считать, что спектральная плотность потока принимаемого излучения в пределах полосы постоянна, а сама полоса симметрична относительно ее середины, то получаемая диаграмма относится к средней частоте полосы пропускания высокочастотного тракта. В частности, если применяется приемник супергетеродинного типа и коэффициент передачи зеркального канала равен коэффициенту передачи основного канала, то измеряемая диаграмма относится к частоте гетеродина. Если используются усилители высокой частоты, то диаграмма относится к средней частоте в усиливаемой полосе. Положение главного максимума диаграммы во всей полосе не меняется.

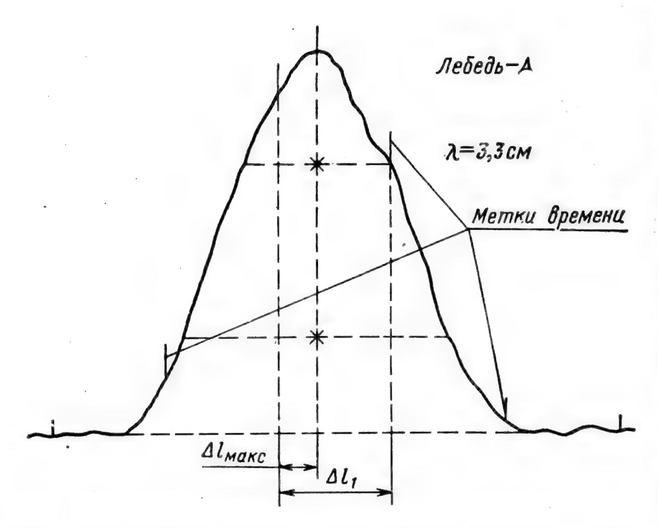


Рис. 13.3. Пример записи прохождения источника через диаграмму направленности антенны.

прохождения этого источника при различных углах, получают все сечения **диаграммы** направленности.

Для получения кривых, мало отличающихся от диаграммы направленности, целесообразно производить записи прохождения источников с малой постоянной времени радиометра. Удовлетворительными являются постоянные

Измерение коэффициента усиления антенны. Коэффициент усиления антенны определяется из выражения $G=4\pi S_{эф}/\lambda^2$.

Эффективную площадь $S_{эф}$ можно получить из соотношения, связывающего антенную температуру источника T_A с плотностью потока его радиоизлучения $s_{ки}$,

$$T_A = s_{ки} S_{эф} / 2k\mathcal{G},$$

где k — постоянная Больцмана; $\mathcal{G}$ — коэффициент, учитывающий соизмеримость угловых размеров диаграммы направленности рабочей антенны и источника, принятого за эталонный.

Отсюда следует, что измерению коэффициента усиления должно предшествовать снятие диаграммы направленности антенны.

Таким образом, задача определения $S_{эф}$ сводится к измерению антенной температуры источника T_A.

Измерение эффективной площади антенны проводится обычно в следующей последовательности:

1. Антенна направляется в упрежденную расчетную точку на небесной сфере, через которую вследствие суточного вращения должен пройти источник внеземного радиоизлучения, используемый для измерений. Время упреждения выбирается с таким расчетом, чтобы можно было успеть выполнить калибровку по п. 2. Включается протяжка самописца, регистрирующего выходное напряжение радиометра.

2. Производится запись калибровочной «ступеньки». Для этого на ленту самописца последовательно записывается выходное напряжение радиометра от его калибровочного устройства с последовательным включением «холодной» и «горячей» нагрузок.

3. Подбирается усилие радиометра и отмечается величина изменения усиления $\varkappa$ при переходе от записи кали-

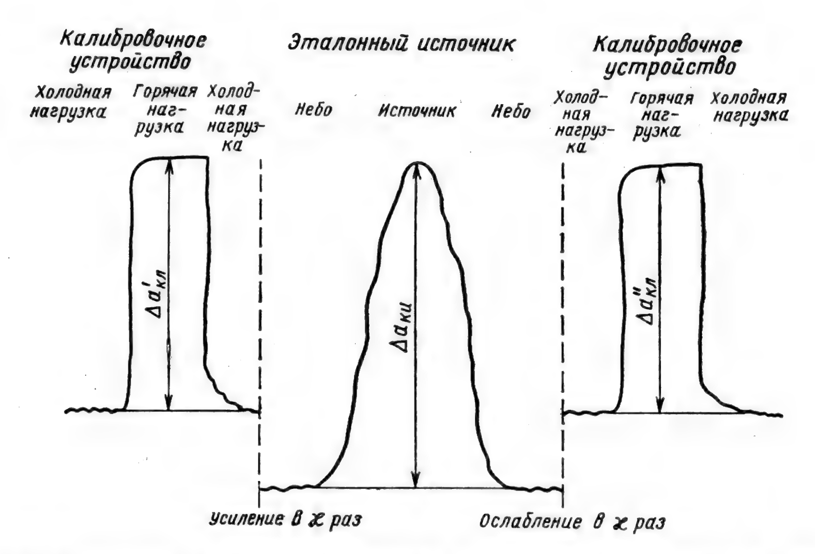


Рис. 13.4 Примерный вид ленты с записями калибровочной ступеньки и эталонного источника, произведенными для определения эффективной площади антенны.

бровочной «ступеньки» к записи источника.

4. Записывается прохождение источника через диаграмму направленности, при этом протяженность этой записи должна быть достаточной для прохождения через диаграмму направленности источника и соседних с ним областей неба.

5. Вновь устанавливается усиление, выбранное для записи калибровочной «ступеньки», и производится повторная ее запись.

Примерный вид ленты самописца с записями, произведенными в указанной последовательности, приведен на рис. 13.4.

Измеренная антенная температура источника определяется из очевидного соотношения

$$T_{A} = \Delta T_{кл} \Delta a_{ки} / \varkappa \Delta a_{кл},$$

где $\Delta T_{кл}$ — величина калибровочной «ступеньки» шумового генератора; $\Delta a_{ки}$ — отклонение самописца при прохождении источника; $\Delta a_{кл} = 0{,}5(\Delta a'_{кл} + \Delta a''_{кл})$ — среднее отклонение самописца при включении калибровочной «ступеньки» до и после прохождения источника.

Для уменьшения случайной ошибки обычно производится несколько подобных серий измерений и берется среднее значение измеренной антенной температуры.

Для уменьшения систематической ошибки измерения, обусловленной неточным знанием $\varkappa$ и для упрощения процедуры измерений желательно производить калибровку и запись источника на одной шкале без переключения усиления.

Выбор источников, обеспечивающих в данных условиях необходимое пре-

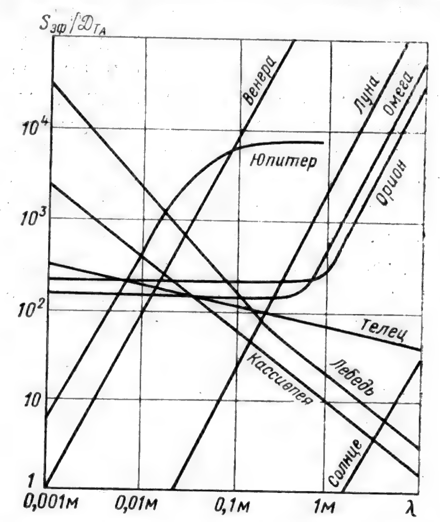


Рис. 13.5. График для выбора источников, обеспечивающих в данных условиях необходимое превышение сигнала над дисперсией шума.

вышение сигнала над дисперсией шума D_{T_A}, можно производить с помощью графика, приведенного на рис. 13.5. Для пользования этим графиком необходимо

оценить ожидаемую эффективную площадь антенны $S_{эф}$ и нанести на график точку с координатами λ и $S_{эф}/D_{T_A}$. Все источники, находящиеся на этой точке, обеспечивают не меньше чем пятикратное превышение сигнала над шумовой дорожкой. Для использования же источников, находящихся выше этой точки, требуется улучшить чувствительность аппаратуры.

Внеземное радиоизлучение волн миллиметрового, сантиметрового и дециметрового диапазонов ослабляется вследствие поглощения земной атмосферой и гидрометеорами.

Так как трудно учесть ослабление внеземного радиоизлучения, то измерения на волнах короче 20 см целесообразно проводить при ясной погоде или умеренной облачности, когда достаточно учесть только атмосферные поглощения.

13.4. ПРОВЕРКА ПАРАМЕТРОВ ФИДЕРНЫХ ЛИНИЙ

В практике эксплуатации бывает необходимо знать коэффициент укорочения. Это нужно, например, для правильного определения длин отрезков фидерных линий сложной антенной системы, при которых обеспечивается требуемая фазировка ее элементов, а также в других случаях.

Отношение скорости света c к фазовой скорости в фидерной линии называется коэффициентом скорости

$$n_{ск}=c/v_{ф}.$$

В гибких коаксиальных фидерных линиях $n_{ск}>1$ и называется коэффициентом укорочения, в волноводах — $n_{ск}<1$.

Величина коэффициента укорочения может быть измерена резонансным методом [47]. Для этого последовательно включаются измеритель коэффициента бегущей волны, коаксиальная вставка с гнездом для параллельного включения кабеля и согласованная нагрузка. Питание подается от генератора через аттенюатор, благодаря чему цепь оказывается согласованной с двух сторон. Кабель с одной стороны замкнут накоротко перемычкой, с другой — слабо связан с цепью (его жила погружается на небольшую глубину в коаксиальную вставку). Поэтому на частотах, далеких от резонансной, цепь остается согласованной, что регистрируется измерителем коэффициента бегущей волны. Изменением частоты добиваются резонанса на частоте f_{01}, что фиксируется на измерителе резким падением коэффициента бегущей волны. Плавно увеличивая частоту, определяют вторую точку резонанса f_{02}. Коэффициент укорочения находится из выражения

$$n_{ск}=c/2l(f_{02}-f_{01}),$$

где l — длина кабеля.

Для уточнения результата рекомендуется найти несколько чередующихся резонансных частот в пределах интересующего диапазона.

Описанным выше резонансным методом измерения коэффициента укорочения можно измерять и волновое сопротивление ρ. Существуют и другие методы измерения волнового сопротивления ρ.

Один из них — измерение электростатической емкости отрезка кабеля при постоянном токе или при низких частотах. Зная емкость, длину и размеры поперечного сечения, вычисляют волновое сопротивление по формуле

$$\rho=\sqrt{3333\rho_0 l/C},$$

где C — измеренная емкость, пФ; l — длина отрезка кабеля, м; ρ_0 — волновое сопротивление при воздушной среде между проводами, Ом.

Волновое сопротивление фидера находится по известной кривой частотной зависимости активной части его входного сопротивления. Для этого фидер с одного конца замыкается на любую комплексную нагрузку, а с другой — присоединяется к установке для измерения входного сопротивления. Снимается и вычерчивается кривая активной части входного сопротивления в таком интервале частот, чтобы на ней были точки минимума и максимума (рис. 13.6).

На основе полученной кривой ρ вычисляется по формуле

$$\rho = (R_{\text{макс}} R_{\text{мин}})^{1/2}. \qquad (13.4)$$

Точность измерений возрастает с ростом значения $R_{\text{мин}}$, поэтому желательно применять активные нагрузки, оринтировочно близкие к ожидаемому значению волнового сопротивления.

Формула (13.4) не учитывает затухание в фидере. Чтобы это не приводило к заметным ошибкам, рекомендуется производить измерения на фидерах сравнительно небольшой длины (но такой, чтобы в измеряемом диапазоне имелось не менее одного максимума и одного минимума) и выбирать нагрузку, близкую к волновому сопротивлению.

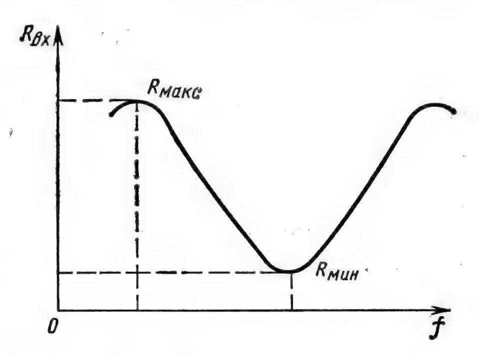


Рис. 13.6. Вид кривой зависимости активной составляющей входного сопротивления фидера, нагруженного на комплексную нагрузку, от частоты.

Допустимо не снимать всю кривую зависимости $R_{\text{вх}}$ от f, а ограничиться измерением $R_{\text{вх}}$ на двух смежных резонансных частотах методом, описанным выше.

Для определения волнового сопротивления используется также измерение реактивной части $X_{\text{вх}}$ входного сопротивления короткозамкнутого и разомкнутого фидера.

Коэффициент затухания $K_{\text{зтх}}$ измеряется резонансным методом. Замкнутый накоротко с обеих сторон отрезок фидера имеет слабую связь с одной стороны с цепью питания, состоящей из генератора с волномером, аттенюатора, измерителя мощности, а с другой стороны — с индикаторной цепью, состоящей из детекторно-усилительной схемы и прибора. В качестве короткозамыкателей целесообразно использовать специальные отрезки фидера с плунжерами. В этих отрезках фидера предусматриваются элементы связи с цепями питания и индикации.

В качестве измерителя мощности используется рефлектометр.

Фидер настраивается в резонанс перемещением закорачивающих поршней или подбором частоты колебаний генератора. Настройка производится по максимуму показаний прибора нидикаторной цепи. Зафиксировав резонансную длину волны λ_0, мощность P, поступающую в фидер, и показания прибора, аттенюатором увеличивают мощность в 2 раза. При этом увеличивается показание прибора. Затем, плавно укорачивая и удлиняя волну, добиваются первоначальных показаний прибора при более короткой волне $\lambda_1 = \lambda_0 - \Delta\lambda$ и более длинной $\lambda_2 = \lambda_0 + \Delta\lambda$.

Коэффициент затухания фидера определяется по формуле

$$K_{\text{зтх}} = \pi (\lambda_2 - \lambda_1) / \lambda^2_0.$$

В случае волновода коэффициент затухания равен

$$K_{зтх} = \pi \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_0^2} \cdot \frac{\lambda_ф}{\lambda}.$$

Вместо изменения длины волны вносят расстройку в фидер, меняя его длину перемещением поршней и добиваясь первоначальных показаний прибора индикаторной цепи при укорочении и удлинении фидера. В этом случае

$$K_{зтх} = 2\pi\Delta l/\lambda_ф l_0,$$

где l_0 — резонансная длина фидера; Δl — разность наибольшей и наименьшей длин, соответствующих половинной мощности по сравнению с мощностью резонанса.

При большой длине фидера или большой величине коэффициента затухания $K_{зтх}$ измеряется путем сравнения мощностей на входе и выходе. Фидер подключается с одной стороны к цепи питания, состоящей из последовательно соединенных генераторов, аттенюатора, измерителя мощности, а с другой — к измерителю мощности и согласованной нагрузке. Первым измерителем мощности определяется мощность P_1, поступающая в фидер, а вторым — мощность P_2, выходящая из фидера. При хорошем согласовании фидера с нагрузкой коэффициент затухания равен

$$K_{зтх} = 0{,}5 l^{-1} \ln P_1/P_2,$$

где l — длина фидера.

Измерения можно производить как при двух измерителях мощности, так и при одном, переключаемом.

13.5. НАСТРОЙКА АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ

Сущность настройки антенно-фидерных устройств сводится к согласованию их с генератором в диапазоне рабочих частот этого генератора.

Показателем согласования является коэффициент стоячей волны или коэффициент бегущей волны.

На практике реальные фидерные линии всегда имеют много неоднородностей в виде соединительных и переходных устройств, вращающихся сочленений и т. п. В результате в фидерной линии возникают отражения электромагнитной энергии, и коэффициент бегущей волны будет отличаться от единицы. Это приводит к потере мощности в линии и изменению режима работы генератора.

Для сокращения потерь мощности и обеспечения оптимального режима генератора необходимо уменьшить отражения как на обоих концах фидерной линии, так и от всех имеющихся неоднородностей. Задача согласования заключается в полном или частичном устранении отражений в фидерной линии в заданной полосе рабочих частот. Для согласования в условиях эксплуатации используются специальные, предусмотренные для этой цели, согласующие элементы: подвижные четвертьволновые трансформаторы, штыри (винты), шлейфы, поршни.

Перед комплексной настройкой антенно-фидерного устройства отдельно настраиваются вращающиеся сочленения, отражатель с облучателем и др.

Настройка вращающегося сочленения преследует две цели — получение наилучшего (наименее возможного) коэффициента стоячей волны в диапазоне рабочих частот и необходимой симметрии сочленения.

Эти параметры должны быть указаны в технических условиях на вращающееся сочленение. Настройку лучше начинать с симметрирования путем подбора надлежащего положения поршней. Положение поршней подбирается таким, чтобы обеспечивалось постоянство коэффициента стоячей волны при вращении перехода (симметрия по согласованию). Обычно измерение коэффициента стоячей волны производится через каждые $\pi/3 \ldots \pi/2$, а затем подсчитывается среднеарифметическое значение коэффициента стоячей волны и отклонение от этого среднего значения максимальной и минимальной величины коэффициента стоячей волны. Измерения коэффициента стоячей волны производятся на всех заданных частотах.

После симметрирования вращающегося сочленения осуществляется согласование волноводов прямоугольного сечения с круглым волноводом. Согласование волноводов достигается путем перемещения четвертьволнового трансформатора, расположенного на входе вращающегося сочленения, до получения минимального коэффициента стоячей волны. Вначале производится проверка и настройка со стороны входа, а затем и выхода вращающегося перехода. Закрепление положения настроечных элементов перехода осуществляется с помощью стопорных винтов, штифтов или пайки. Четвертьволновые трансформаторы закрепляются специальным клеем.

Показателем симметрии сочленения является также величина фазового сдвига минимума стоячей волны, отсчитываемого при вращении сочленения. Определение фазового сдвига совмещается с измерением коэффициента стоячей волны сочленения. Вращающийся переход проверяется на электрическую прочность. При этом мощность передатчика постепенно повышается до максимальной. Наступление пробоя определяется на слух по характерному потрескиванию или звуковому сигналу. Проверка на электрическую прочность производится при нескольких положениях подвижной части перехода.

Критерием работы облучателя является коэффициент стоячей волны, а для сканирующих устройств — еще и симметрия вращающегося сочленения (или фазовый сдвиг). Если облучатель защищается колпаком из диэлектрика, проверку параметров облучателя необходимо производить после установки этого колпака.

В СВЧ диапазоне приходится в ряде случаев подстраивать антенны для достижения заданных параметров. Антенны различных типов настраиваются разными способами. Так, при настройке зеркальных антенн производится установление оптимального взаимного расположения облучателя и отражателя. При настройке вибраторных антенн типа «волновой канал» подбирается оптимальное расстояние между рефлектором и активным вибратором и между активным вибратором и директорами. В конструкции зеркальной антенны, как правило, предусматривается возможность некоторого перемещения отражателя для изменения фокусного расстояния. Изменяя фокусное расстояние, можно улучшить заданные параметры (диаграмма направленности, уровень боковых лепестков, коэффициент усиления).

Для получения необходимой ширины диаграмм направленности и уровня боковых лепестков в горизонтальной плоскости в ряде случаев изменяется наклон отражателя (регулировка антенны в вертикальной плоскости).

При измерении коэффициента стоячей волны антенн следует принять необходимые меры для исключения возможности отражений от

окружающих предметов, так как это может оказать влияние на результаты измерений. Как правило, при измерении коэффициента стоячей волны антенна направляется в открытое пространство.

Если настройка элементов антенно-фидерных устройств почему-либо не удается, то снимается частотная характеристика элемента. Для наглядности лучше всего построить график, отложив по одной оси частоту (длину волны), а по другой — значения коэффициента стоячей волны. В случае настройки не всего тракта, а какого-либо одного участка, обычно получается одна из четырех частотных характеристик (рис. 13.7).

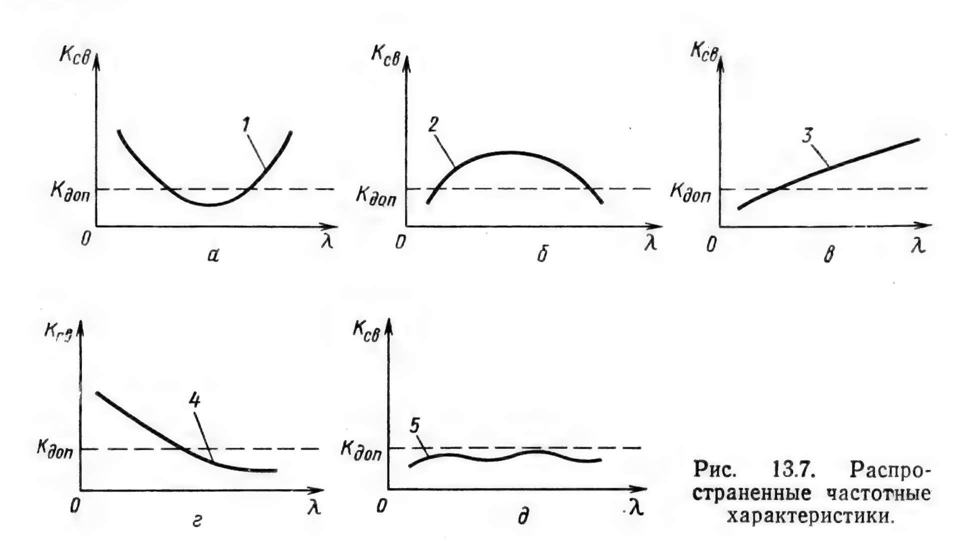


Рис. 13.7. Распространенные частотные характеристики.

Методы настройки различны. При наличии кривой *1* целесообразно добиваться наименьшего коэффициента стоячей волны на средней частоте диапазона. Тогда коэффициент стоячей волны на краях диапазона также будет снижаться. При наличии кривой *2* следует провести небольшое рассогласование на крайних точках диапазона, где коэффициент стоячей волны значительно ниже нормы. В этом случае коэффициент стоячей волны на средних частотах диапазона может уменьшится. Тот же самый метод применим и для кривых *3* и *4*, только при этом следует добиваться уменьшения коэффициента стоячей волны на одном из краев диапазона за счет увеличения его на другом.

Когда производится настройка двух или нескольких элементов, целесообразно использовать их взаимную компенсацию. Так, при соединении двух элементов, имеющих частотные характеристики, аналогичные кривым *3* и *4*, при соответствующих фазовых соотношениях возможно получение новой частотной характеристики (кривая *5*), лежащей ниже предельно допустимого значения коэффициента стоячей волны. Учитывая взаимную компенсацию отдельных элементов, настройку каждого элемента следует рассматривать не как самостоятельную задачу, а как составную часть общей регулировки, имеющей целью предварительную подготовку отдельных элементов. Если же элементы спроектированы так, что равномерной частотной характеристики и низких значений коэффициента стоячей волны добиться за-

труднительно, приходится пользоваться методами взаимной компенсации.

При настройке антенно фидерных устройств следует производить измерение коэффициента стоячей волны на низком уровне мощности. Количество точек по диапазону, в которых осуществляется измерение коэффициента стоячей волны, зависит от равномерности частотной характеристики устройства. В длинных фидерных линиях с множеством сочленений и отражающих элементов (изгибов, скруток, вращающихся сочленений и т. п.) на отдельных частотах получается такое фазирование энергии от отражающих элементов, что коэффициент стоячей волны будет резко изменяться при изменении частоты всего на несколько мегагерц. При этом частотная характеристика представляется ломаной линией с большим числом перегибов.

Глава 14

РАДИОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА

14.1. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ РАДИОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ И ПАРАМЕТРЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ КОНТРОЛЮ

В зависимости от назначения и задач, решаемых измерительными комплексами, входящими в их состав радиоприемные устройства отличаются диапазоном рабочих частот, видом принимаемого сигнала, схемным построением, конструктивным выполнением и качественными показателями.

Отличительной особенностью используемых радиоприемных устройств является их высокая чувствительность, достигающая в коротковолновых приемниках — 2 мкВт, а в сантиметровых — 10^{-14} Вт и выше [36]. Одним из методов реализации такой чувствительности является сужение полосы пропускания до предельной для данного спектра сигнала.

Второй особенностью радиоприемных устройств является широкий динамический диапазон, что обусловлено необходимостью приема сигналов при больших колебаниях их уровня. Широкий динамический диапазон позволяет приемнику работать без перегрузок при воздействии сильных сигналов и помех. Количественно динамический диапазон определяется по входному или выходному сигналу.

Динамическим диапазоном по входному сигналу называется отношение максимальной входной мощности $P_{\text{вх макс}}$, при которой отсутствует перегрузка приемника, к минимальной входной мощности $P_{\text{вх мин}}$, соответствующей предельной чувствительности приемника:

$$Д_{\text{вх}} = 10 \lg (P_{\text{вх макс}}/P_{\text{вх мин}}) \ [\text{дБ}].$$

Аналогично определяется динамический диапазон по выходному сигналу:

$$Д_{\text{вых}} = 10 \lg (P_{\text{вх макс}}/P_{\text{вых мин}}) \ [\text{дБ}].$$

Иногда динамический диапазон определяется через напряжения. В современных радиоприемниках динамический диапазон превышает 80 дБ [36].

В реальных условиях прием сигналов идет в присутствии помех. Поэтому приемники обладают высокой помехозащищенностью, т. е. обеспечивают нормальную работу оконечных устройств в условиях воздействия помех.

В качестве простейшей меры для защиты от пассивных помех используется селекция движущейся цели [46], а для защиты от активных помех — перестройка приемника синхронно с передатчиком на другую частоту.

К числу параметров радиоприемника, которые контролируются в процессе эксплуатации, относятся избирательность, коэффициент шума, чувствительность.

При необходимости проверяется также эффективность работы АРУ и антенные переключатели.

14.2. КОНТРОЛЬ И ПРОВЕРКА ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ

Частотно-избирательные свойства радиоприемника и его отдельных каскадов оцениваются по частотным характеристикам.

Резонансный или *амплитудно-частотной характеристикой* **(АЧХ)** линейной части приемника называется зависимость коэффициента усиления синусоидального напряжения от частоты

$$АЧХ = K_{(f)} = U_{вых(f)}/U_{вх(f)}. \quad (14.1)$$

Аналогичным образом определяются АЧХ отдельных усилительных высокочастотных каскадов приемников. Для удобства сравнения АЧХ выражаются в относительных единицах $K(f)/K_0$, где K_0 — резонансный коэффициент усиления. Степень равномерности центральной части АЧХ оценивается полосой пропускания, под которой понимается полоса частот, в пределах которой коэффициент усиления уменьшается в 1,41 раза относительно своего значения на резонансной частоте.

Для снятия АЧХ на вход приемника подается сигнал от ГСС. Выходное напряжение измеряется с помощью лампового вольтметра. Получающаяся при этом характеристика имеет вид резонансной кривой. Полоса пропускания будет ограничиваться двумя частотами; нижней и верхней, для которых ординаты нормированных АЧХ равны 0,707.

В пределах полосы пропускания гармоники частотного спектра сигнала усиливаются примерно одинаково, т. е. пропускаются без существенных амплитудных искажений.

Таблица 14.1

Измерители амплитудно-частотных характеристик [27, 28].

Тип прибора	Диапазон рабочих частот, МГц	Полоса свипирования, МГц		Чувствительность индикатора, мм/мВ
		минимальная	максимальная	
Х1-7Б	0,4...235 430...980	0,5	15	4
Х1-19А	0,5...1000	0,5	100	25
Х1-30	0,5...1500	0,15	500	3,5
Х1-39	0,1...100	—	100	1

Примечание. Все приборы имеют выходное сопротивление 75 Ом.

Для быстрого определения полосы пропускания можно ограничиться замером выходного напряжения на резонансной частоте и граничных частотах, соответствующих уменьшению выходного напряжения в 1,41 раза относительно его значения при резонансной частоте.

Визуальный контроль АЧХ осуществляется с помощью генератора качающейся частоты (свип-генератора). Частота такого генератора изменяется по определенному закону в установленной полосе частот. Измерители АЧХ (табл. 14.1) выпускаются в виде самостоятельных приборов и используются для наблюдения и исследования характеристик радиоприемных устройств.

14.3. ШУМОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРИЕМНИКА

Прием сигналов всегда осуществляется в присутствии шумов. Источниками их являются шумы, поступающие через антенно-фидерный тракт, а также шумы, возникающие в самом приемнике и проходящие на его выход.

До недавнего времени собственные шумы, как правило, вносили основной вклад в выходные шумы приемника. С появлением малошумящих усилителей, используемых во входных каскадах приемников, заметную роль стали играть внешние шумы.

Для оценки возможности приема сигнала в условиях помех вводят понятие *коэффициента различимости,* под которым понимают минимально необходимое для выделения полезного сигнала отношение мощности сигнала к мощности шумов на выходе линейной части приемника (входе детектора)

$$q_р (P_{с\,вых}/P_{ш\,вых})_{мин}. \qquad (14.2)$$

Нормальная работа оконечных устройств возможна, если обеспечивается соотношение

$$(P_{с\,вых}/P_{ш\,вых})_{мин} \geqslant q_р.$$

Значение коэффициента различимости зависит от методов выделения сигнала из шума, т. е. типа оконечных устройств, а также свойств детектора. При визуальном наблюдении сигнала на индикаторе $q_р$ зависит от опытности оператора и составляет обычно 0,5 ... 2; для уверенной работы системы автоматического сопровождения $q_р = 2 \ldots 5$ [8].

Интенсивность собственных шумов приемника оценивается коэффициентом шума, который показывает, во сколько раз снижается отношение мощности сигнала к мощности шума на выходе линейной части по сравнению с тем же отношением на его входе

$$K_ш = (P_с/P_ш)_{вх}/(P_с/P_ш)_{вых},$$

или

$$K_ш = P_{ш\,вых}/P_{ш\,вх} K_p, \qquad (14.3)$$

а также

$$K_ш = 1 + P_{ш\,вх\,э}/P_{ш\,вх},$$

где $P_{ш\,вх}$ — мощность шумов, поступающих на вход приемника; $P_{ш\,вых} = P_{ш\,вх} K_p + P_{ш\,вых\,соб}$ — суммарная мощность шумов на выходе приемника, обусловленная как собственными, так и внешними шумами, поступающими на его вход; $P_{ш\,вх\,э} = P_{ш\,вых\,соб}/K_p$ — эквивалентная мощность собственных шумов приемника, приведенная к его входу. $K_p = P_{с\,вых}/P_{с\,вх}$ — коэффициент усиления приемника по мощности.

Как видно из (14.3), коэффициент шума не зависит от полосы пропускания приемника и показывает, во сколько раз возрастает мощность (энергетическая спектральная плотность) шумов на выходе приемника за счет его собственных шумов.

Наиболее распространенным значением $P_{ш\,вх}$, принимаемым для расчета и измерения $K_ш$, является номинальная мощность шумов источника сигнала, находящегося при стандартной комнатной температуре $T_0 = 290$ К, равная

$$P_{ш\,вх} = kT_0 \Delta f_э, \qquad (14.4)$$

где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; $\Delta f_э$ — эквивалентная шумовая полоса.

По аналогии с (14.4) величина $P_{ш\,вх\,э}$ будет:

$$P_{ш\,вх\,э} = kT_э \Delta f_э.$$

Тогда коэффициент шума запишется в виде

$$K_ш = 1 + T_э T_0$$

и шумовые свойства приемника можно характеризовать шумовой температурой

$$T_э = T_0 (K_ш - 1).$$

Для измерения коэффициента шума радиоприемных устройств используются генераторы шумовых сигналов, которые имеют определенные спектральные и амплитудные характеристики.

Существуют следующие источники шумовых сигналов [48]:

— теоретические шумовые генераторы;
— шумовые вакуумные диоды;
— газоразрядные шумовые генераторы;
— полупроводниковые генераторы шума.

Каждый источник шума характеризуется присущими ему энергетическими показателями. Так например, ток шумового диода рассчитывается по формуле [35]:

$$I^2_{\text{ш.д}} = 2eI_s\Delta f_э,$$

где e — заряд электрона, I_s — ток насыщения диода.

Величину выходной мощности легко регулировать изменением анодного тока.

Наиболее широкое распространение в качестве первичных источников шумов нашли вакуумные диоды (табл. 14.2) и газоразрядные лампы (табл. 14.3). По сравнению с другими источниками они обладают высоким уровнем шума, большой равномерностью спектральной характеристики, широким диапазоном частот, удобством в эксплуатации и достаточной надежностью.

Таблица 14.2

Диодные генераторы шумовых сигналов [28]

Тип прибора	Рабочая полоса частот, МГц	Величина выходного сигнала	Погрешность установки выходного сигнала, %	Выходное сопротивление, Ом
Г2-37	$15\cdot10^{-6}\ldots6{,}5$	$10^{-6}\ldots1$ В	4	50; 60
Г2-12	$2\cdot10^{-5}\ldots2\cdot10^{-2}$	3 Вт	6	5; 100; 600
Г2-32	1...600	$1\ldots50\ kT_0$	15	75

Таблица 14.3

Газоразрядные генераторы шумов [27, 28]

Тип прибора	Спектр шумов, ГГц	Уровень выходного сигнала, kT_0		ВЧ тракт		КСВ
		выход 1	выход 2	коаксиальный, Ом	волноводный, мм	
Г2-31	0,9...4	20...80	2...6	50	—	1,6; 1,3
Г2-8Б	4,1...5,5	20...70	2...6	—	48×24	1,3; 1,1
Г2-9Б	5,5...8,1	20...70	2...6	—	35×15	1,3; 1,1
Г2-10Б	8,1...11,5	20...70	2...6	—	23×10	1,3; 1,1
Г2-39	1...4	55...72	—	50	—	1,4; 1,6
Г2-40	8,25...12,04	55...72	—	—	23×10	1,25; 1,3

Для измерения коэффициента шума и настройки приемных устройств на его минимальное значение используются соответствующие измерители (табл. 14.4). При измерении коэффициента шума прибор должен работать в комплекте с соответствующим генератором шума. Например, измеритель коэффициента шума Х5-5А работает в комплекте с генератором шума Г2-9Б, Г2-10Б и т. д.

Функциональная схема измерения коэффициента шума приемника приведена на рис. 14.1. Сопротивление $R_г$ представляет эквивалент антенны, с которым согласуется входное сопротивление приемника $R_{вх\,пр}=R_г$. Эквивалентное сопротивление, на которое нагружен генератор шума, $R_э=R_г/2$.

Таблица 14.4

Измерители коэффициента шума [27]

Тип прибора	Диапазон частот входного сигнала, МГц	Чувствительность, мкВ	Диапазон измерения		Погрешность измерения, %	
			$K_ш$	$K_{ус}$	$K_ш$	$K_{ус}$
Х5-5А	15...105	50	0,15...300	0...40	6	10
Х5-11	10...120	50	0,15...300	0...40	5	6

Задача измерения $K_ш$ сводится к определению полной выходной шумовой мощности $P_{ш\,вых}$, деленной на K_p. Методика измерения $P_{ш\,вых}/K_p$ состоит из двух этапов:

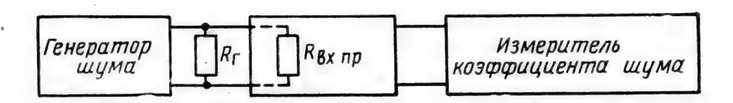


Рис. 14.1. Функциональная схема измерения коэффициента шума приемника.

1. Выключают генератор стандартного шума и замечают показания измерителя шума. При этом на вход будут поступать шумы от сопротивления $R_г$, усиленные в K_p раз, и собственные шумы приемника

$$P_{ш\,вых1}=P_{ш\,вх}K_p+P_{шсоб}.$$

2. Включают генератор стандартного шума и устанавливают такое значение его мощности, чтобы мощность шумов на выходе увеличивалась в q раз (для квадратичной характеристики детектора $q=2$, для линейной $q=1{,}41$)

$$P_{ш\,вых2}=qP_{ш\,вых1}=P_{ш\,вых1}+K_pP_{ш\,г},$$

$P_{ш\,г}$ — мощность генератора стандартного шума. Из последнего выражения находят

$$P_{ш\,вых1}/K_p=P_{ш\,г}/(q-1).$$

Учитывая (14.3), коэффициент шума будет равен

$$K_ш=P_{ш\,г}/(q-1)P_{ш\,вх}. \quad (14.5)$$

Допустим, что при измерении использовался диодный генератор шумовых сигналов, а характеристики детектора приемника квадратичная $q=2$. С учетом того, что $I^2_{ш\,д}=2eI_s\Delta f_э$ и $R_э=R_г/2$, мощность шумов диода запишется в виде

$$P_{ш\,д}=I^2_{ш\,д}R_э=eI_s\Delta f_эR_г. \qquad K_ш=eI_sR_г/kT_0.$$

Заменив в (14.5) $P_{ш\,г}$ на $P_{ш\,д}$ и подставив $P_{ш\,вх}$ из (14.4), получим

Коэффициент шума современных приемников сантиметрового диапазона может составлять 1 ... 2 дБ [15]. Столь малый коэффициент шума обеспечивается за счет применения в усилителях СВЧ ламп бегущей волны (ЛБВ), имеющих малый собственный коэффициент шума, и других малошумящих усилителей.

14.4. ИЗМЕРЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Чувствительность приемника характеризует его способность принимать слабые сигналы. Она, как известно, зависит от уровня внутренних шумов приемного устройства и уровня внешних шумов, воздействующих на его вход.

Различают предельную и реальную чувствительность.

Предельной чувствительностью приемника $P'_{\text{пр мин}}$ называется такая мощность полезного сигнала на его входе, при которой мощность сигнала и мощность шумов на выходе линейной части получаются одинаковыми

$$P'_{\text{пр мин}} = K_{\text{ш}} k T_a \Delta f. \qquad (14.6)$$

Как видно из (14.6), предельная чувствительность определяется исключительно уровнем шумов на входе приемника и его коэффициентом шума.

Реальной чувствительностью приемника называется такая мощность полезного сигнала на входе $P_{\text{пр мин}}$, при которой отношение мощности сигнала к мощности шумов на выходе приемника получается равным коэффициенту различимости.

Таким образом, реальная чувствительность приемника равна минимальной мощности сигнала на его входе, при которой еще обеспечивается нормальная работа оконечных устройств

$$P_{\text{пр мин}} = q_{\text{р}} K_{\text{ш}} k T_a \Delta f. \qquad (14.7)$$

Следовательно, реальная чувствительность приемника тем выше, чем меньше коэффициент различимости, коэффициент шума и полоса пропускания.

Чувствительность приемника выражается в единицах мощности или в децибелах, относительно условного опорного уровня мощности $P_{\text{оп}}$

$$Ч_{\text{пр мин}} = 10 \lg P_{\text{оп}}/P_{\text{пр мин}} \text{ [дБ]}.$$

За опорный уровень принимают $P_{\text{оп}} = 1$ Вт или же $P_{\text{оп}} = 10^{-3}$ Вт $= 1$ мВт. В последнем случае чувствительность выражается в децибелах на милливатт. Например, $P_{\text{пр мин}} = 10^{-10}$ Вт, что соответствует 100 дБ относительно 1 Вт или 70 дБ относительно 1 мВт.

Реальную чувствительность можно определить по измеренному значению коэффициента шума, заданному значению коэффициента различимости и полосы пропускания (см. 14.7). Но ее можно измерить и непосредственно с помощью генератора стандартных сигналов. При этом сигнал от генератора на вход приемника следует подавать через эквивалент антенны.

Оценку высокочувствительных приемников целесообразно производить по их шумовой температуре. При этих измерениях используются охлажденные генераторы или внеземные источники излучения. Комплект охлажденных генераторов шума Г2—33 . . . Г2-36 [27] обеспечивает выдачу калиброванного шумового сигнала в диапазоне частот 0,1 ... ... 12,04 ГГц. Номинальное значение температуры шума на выходе генераторов равно 80±1 К.

В табл. 14.5 приведены [1] основные данные некоторых дискретных внеземных источников радиоизлучения, видимых с территории Советского Союза. Реальную мощность шумов, принимаемую в полосе 1 Гц антенной, ориентированной в направлении дискретного источника, получают путем умножения величины потока радиоизлучения, определенной из табл. 14.5, на эффективную площадь антенны.

Эквивалентная шумовая температура дискретных источников, приведенная к антенне, определяется выражением

$$T_{ист\,a} = ПS_{эф}/2k, \qquad (14.8)$$

где П — плотность потока мощности; $S_{эф}$ — эффективная площадь антенны; k — постоянная Больцмана.

Таблица 14.5

Внеземные источники радиоизлучений

Источник	Координаты		Поток радиоизлучения $\times 10^{-24}$ Вт/м² Гц в диапазоне волн, см				
	прямое восхождение	склонение	3,2	10	20	50	100
Кассиопея	23°21′	+58°30′	5,9	15	25	40	150
Лебедь	19°57′	+40°35′	—	8	12	20	110
Телец	05°41′	+22°04′	7,3	8	10	13	18
Дева	12°28′	+12°44′	—	1,8	2,3	3	12
Центавр-А	13°22′	—42°46′	—	2,2	2,8	4,5	18

Угловые размеры подавляющего большинства дискретных источников очень малы. У источников с большой интенсивностью радиоизлучения угловые размеры не превышают нескольких угловых минут. Поэтому для приема излучения от такого источника антенной, имеющей узкую диаграмму направленности, последняя должна быть ориентирована непосредственно на источник.

Рассмотрим методику измерения чувствительности радиоприемника при использовании внеземного источника радиоизлучений. Мощность шумов на выходе приемника без шумов внеземного источника и с их наличием запишется в виде

$$P_{ш\,вых1} = kT_a K_ш \Delta f K_p; \qquad (14.9)$$

$$P_{ш\,вых2} = P_{ш\,вых1} + P_{ш\,ист} K_p, \qquad (14.10)$$

где $P_{ш\,ист}$ — мощность шумов внеземного источника.

Введем обозначение

$$q = P_{ш\,вых2}/P_{ш\,вых1} = U^2_{вых2}/U^2_{вых1},$$

где $U_{вых1}$ — напряжение на выходе приемника при отсутствии шумов внеземного источника; $U_{вых2}$ — напряжение на выходе приемника с учетом шумов, принятых от внеземного источника.

Тогда можно написать

$$P_{ш\,вых2} = qP_{ш\,вых1} = P_{ш\,вых1} + P_{ш\,ист} K_p. \qquad (14.11)$$

Из (14.11) найдем

$$P_{ш\,вых1}/K_p = P_{ш\,ист}/q—1. \qquad (14.12)$$

В соответствии с (14.9) шумы на входе приемника можно записать в форме

$$P_{ш\,вх1} = P_{ш\,вых1}/K_p = kT_{пр}\Delta f, \qquad (14.13)$$

где $T_{пр} = T_a K_ш$ — эффективная температура приемника с учетом антенны.

Мощность шумов внеземного источника в полосе приемника

$$P_{\text{ш ист}} = kT_{\text{ист}}\Delta f. \qquad (14.14)$$

Тогда, подставляя (14.13) и (14.14) в (14.12), получим

$$kT_{\text{пр}}\Delta f = kT_{\text{ш ист}}\Delta f/(q-1).$$

Откуда

$$T_{\text{пр}} = \frac{T_{\text{ш ист}}}{q-1} = \frac{T_{\text{ш ист}}}{(U_{\text{вых2}}/U_{\text{вых 1}})^2 - 1}. \qquad (14.15)$$

Таким образом, для определения чувствительности приемника по шумовой температуре необходимо знать температуру внеземного источника на данный момент времени и измерить напряжение на выходе приемника при отсутствии сигналов на входе от внеземного источника и при их наличии.

Координаты положения и температура внеземного источника шумов известны с большой точностью (см. табл. 14.5). Следовательно, для определения $T_{\text{пр}}$ надо измерить напряжение для случая, когда антенна не принимает шумов внеземного источника и когда она их принимает. Для этого антенна поворачивается в сторону от направления на внеземной источник шумов (это направление определяется заранее с учетом табл. 14.5) и измеряется напряжение $U_{\text{вых1}}$; затем антенна устанавливается по направлению на внеземной источник и измеряется выходное напряжение $U_{\text{вых2}}$.

По формуле (14.15) подсчитывается температура приемника.

Пример 14.1. Приемник работал на волне 3,2 см с антенной, эффективная площадь которой равна 1000 м². В качестве внеземного источника использовалась Кассиопея, а в процессе измерения получено $U_{\text{вых 1}} = 0{,}1$ В, $U_{\text{вых 2}} = 0{,}15$ В. Определить шумовую температуру приемника.

По формуле (14.8) находим

$$T_{\text{ист }a} = \frac{5{,}9\cdot 10^{-24}\cdot 1000}{2\cdot 1{,}38\cdot 10^{-23}} = 214 \text{ К}.$$

Тогда

$$T_{\text{пр}} = \frac{214}{(0{,}15/0{,}1)^2 - 1} = 171 \text{ К}.$$

При наличии в приемнике большого уровня шумов или частичной потере чувствительности следует в первую очередь проверить работу блока УВЧ. В качестве УВЧ в современных приемниках используются малошумящие параметрические усилители, лампы бегущей волны или параметрические усилители (лазеры). Во многих приемниках РЛС сантиметрового диапазона УВЧ отсутствуют, в качестве первого каскада в них используется смеситель.

С помощью смесителя и местного гетеродина высокочастотный сигнал преобразуется в сигнал промежуточной частоты. В качестве местного гетеродина обычно используется отражательный клистрон. Если в усилителе используется лампа бегущей волны, имеющей соленоид, то проверка такого усилителя включает следующие операции: установку номинального электрического режима, настройку и контроль параметров усилителя на ЛБВ.

Электрический режим ЛБВ определяется значением напряжения, накала анода, и величиной тока соленоида. Напряжение накала устанавливается с точностью $\pm 2\%$. Повышение напряжения накала относительно номинального приводит к увеличению уровня собственных шумов.

Допустимые колебания напряжения на соленоиде не должны превосходить ±10%. Изменение тока соленоида более чем на ±10% приводит к расфокусировке пучка электронов, в результате чего уменьшается коэффициент усиления. Уменьшение тока соленоида приводит к падению выходной мощности, а также к увеличению коэффициента шума.

Напряжение на электродах ламп, входящих в блок усилителя, не должно отклоняться от нормального значения более чем на ±2%.

С помощью центровочных приспособлений добиваются такого расположения оси спирали замедляющей системы, при которой она будет располагаться параллельно основным линиям продольного магнитного поля, создаваемого соленоидом. При этом коэффициент усиления будет максимальным, а коэффициент шума — минимальным.

После установки режима производится согласование замедляющей системы с волновым сопротивлением входного фидера и сопротивлением нагрузки. При неполном согласовании ЛБВ с нагрузкой уменьшается усиление, появляются отраженные волны, обратные связи, что может привести к самовозбуждению. Согласование производится путем изменения длины специальных короткозамкнутых отрезков волноводов или коаксиальных линий, включаемых параллельно входу и выходу.

Одной из причин резкого рассогласования выхода ЛБВ с волноводом может быть неточная установка ЛБВ внутри соленоида. Критерием хорошего согласования является максимальный КБВ на входе УСВЧ или максимальный коэффициент усиления. О степени согласования можно судить по изменению тока смесителя с помощью микроамперметра, подключаемого к его выходу. Практические значения КБВ составляют 0,5 . . . 0,6.

Проверка кристаллических смесителей чаще всего производится путем измерения величины выпрямленного тока в цепи нагрузки при подведении номинального напряжения от гетеродина.

14.5. ПРОВЕРКА АНТЕННЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Антенный переключатель связывает три самостоятельных устройства системы: антенну, передатчик и приемник (рис. 14.2).

Он обеспечивает поочередное подключение антенны к передатчику и приемнику. К нему предъявляются следующие требования:

— в момент излучения сигнала не допускать просачивания на вход приемника мощности, способной вывести из строя его элементы;

— обеспечить минимальные потери сигнала как в режиме приема, так и в режиме передачи;

— обладать малым временем восстановления.

Достаточно полно этим требованиям удовлетворяют три схемы антенных переключателей: ответвительные, балансные и ферритовые, которые и нашли широкое [15] практическое применение.

Ответвительная схема антенного переключателя является одной из наиболее ранних. Работа ее основана на использовании двух различных переключающих элементов, включенных в линию передачи между передатчиком и антенной. К недостаткам ответвительных переключателей относятся: ограниченная широкополосность, наличие двух типов разрядников, значительные потери энергии при передаче и т. д.

В диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн более широкое применение находят балансные и ферритовые антенные переключатели.

В балансных переключателях используются гибридные соединения, представляющие собой сочленения волноводных, коаксиальных или других передающих линий, имеющих четыре плеча или четыре ветви. Применяются различные разновидности этих переключателей [15, 34].

Работа ферритового АП основана на использовании невзаимных свойств четырехплечевого ферритового циркулятора. Ферритовые АП по сравнению с антенными переключателями, имеющими разрядники, характеризуются меньшим временем восстановления и бо́льшим сроком службы. Однако они имеют бо́льшие размеры и вес, а для их работы требуются магнитное поле.

Радиопередатчик → Антенный переключатель → Радиоприемник

Рис. 14.2. Схема включения антенного переключателя.

Важнейшим элементом антенных переключателей являются переключательные элементы. От качества их работы зависят характеристики всего антенного переключателя. На СВЧ в качестве переключательных элементов широко применяются [15]: резонансные разрядники, полупроводниковые диодные выключатели, быстродействующие ферритовые переключатели.

Наиболее широко используются резонансные разрядники, особенно в коротковолновом диапазоне СВЧ и при больших переключаемых мощностях.

Полупроводниковые СВЧ диоды являются перспективными переключательными элементами. К их достоинствам относится миниатюрность, большая долговечность, быстродействие и пр.

Быстродействующие ферритовые переключатели используются обычно в качестве элементов дополнительной защиты приемных устройств, если основной защиты оказывается недостаточно.

Защитные свойства антенных переключателей оцениваются ослаблением мощности передатчика на входе приемника (рис. 14.2). Это ослабление выражается в децибелах и равно отношению мощности передатчика $P_{пер}$ к мощности, «просочившейся» на вход приемника во время работы передатчика $P_{пер\ вх\ пр}$,

$$q_{осл} = 10 \lg P_{пер}/P_{пер\ вх\ пр}\ [дБ].$$

$P_{пер}/P_{пер\ вх\ пр}$ может быть отношением как импульсных, так и средних мощностей.

В зависимости от мощности передатчика и типа входных каскадов приемника, ослабление составляет [8] 40 ... 80 дБ.

Потери энергии в антенном переключателе при приеме сигналов оцениваются отношением мощности на входе антенного переключателя, обращенном к антенне $P_{ап\ вх}$, к мощности на выходе антенного переключателя, обращенном к приемнику $P_{ап\ вых}$, и выражается также в дБ

$$q_{ап} = 10 \lg P_{ап\ вх}/P_{ап\ вых}.$$

Эти потери возникают как из-за потребления энергии сигналов в элементах АП, так и вследствие, рассогласования, вносимого АП в линию передачи. Значение этих потерь не должно превышать 1 ... 2 дБ.

Оценка защитных свойств антенных переключателей производится

после измерения мощностей на входе и выходе устройства. При выявлении ухудшения работы антенного переключателя в условиях эксплуатации следует рекомендовать в первую очередь замену соответствующего разрядника или переключателя в целом. В антенных переключателях, сочлененных с волноводами, следует удалить окисление на стенках и проверить плотность соединения отдельных элементов.

Глава 15

АВТОМАТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ВЫДЕЛЕНИЯ ИЗМЕРЯЕМОГО ПАРАМЕТРА

15.1. ТИПЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ВЫДЕЛЕНИЯ ИЗМЕРЯЕМОГО ПАРАМЕТРА И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В состав аппаратуры многих современных РТК входят автоматические устройства выделения измеряемого параметра [18, 23, 44, 46]. Широкое применение находят следующие их типы:

— автоматические устройства выделения сигнала отклонения от равносигнального направления в системах измерения угловых координат;

— автоматические устройства выделения временного положения импульсного сигнала в системах измерения расстояния;

— автоматические устройства выделения частоты и фазы гармонического сигнала в системах измерения скорости, расстояния и угловых координат.

Основу автоматических устройств выделения измеряемого параметра составляют следящие системы.

Качество функционирования следящих систем определяется их основными характеристиками, такими как время установления (регулирования), добротность (коэффициент преобразования по скорости или коэффициент усиления), полоса пропускания и значения динамических и случайных ошибок измерения. Для следящих систем, основанных на схемах фазовой автоподстройки частоты, кроме того, к основным характеристикам следует отнести полосы схватывания и удержания.

Время установления следящей системы, наряду с другими важными параметрами, определяется по переходной характеристике. Типовые переходные характеристики замкнутых астатических следящих систем показаны на рис. 15.1.

Полоса пропускания, добротность и значения коэффициентов ошибок, используемых в разложении динамической ошибки в ряд по производным входной функции, определяются по амплитудно-частотной характеристике. Амплитудно-частотная характеристика снимается как для замкнутой, так и для разомкнутой системы. Типовые амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) замкнутой (*а*) и разомкнутой (*б*) следящей системы представлены на рис. 15.2. На этом же

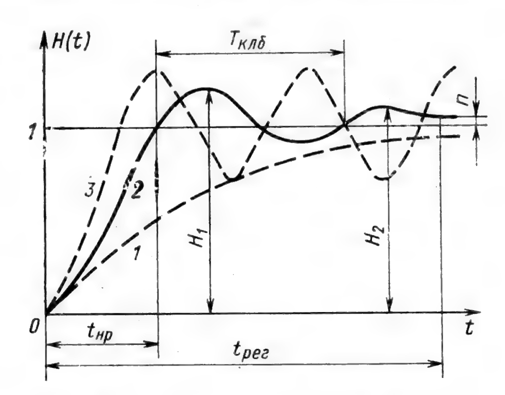


Рис. 15.1. Типовые переходные характеристики замкнутых астатических следящих систем.

рисунке показана асимптота амплитудно-частотной характеристики — логарифмическая амплитудная характеристика (ЛАХ).

Для систем с астатизмом 1-го порядка (в основном применяемых в автоматических устройствах выделения измеряемого параметра) существуют ЛАХ трех основных типов. ЛАХ 1-го типа характеризуется отсутствием перегиба в полосе частот от 0 до $\omega_с$ и наклоном 20 дБ/дек. На частоте $\omega_з$ ЛАХ имеет перегибы и наклоны больше, чем 20 дБ/дек. ЛАХ 2-го типа состоит из

трех участков. Низкочастотный участок и участок в окрестности ω_c имеют наклон 20 дБ/дек, а средний участок на

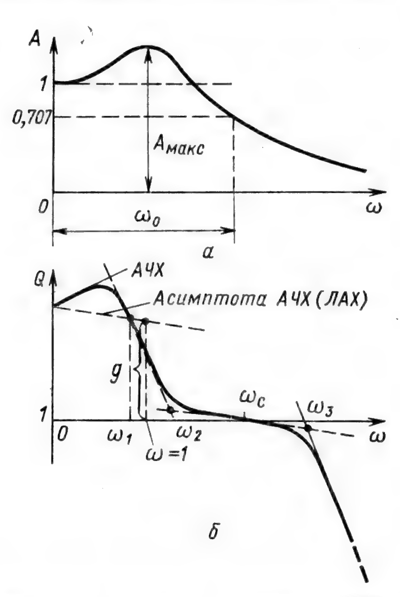


Рис. 15.2. Типовые амплитудно-частотные характеристики следящих систем в замкнутом (*а*) и разомкнутом (*б*) состоянии.

частотах $\omega_1<\omega<\omega_2$—наклон 40 дБ/дек. Чем больше протяженность участка ЛАХ с наклоном в 40 дБ/дек, тем в большей степени следящая система близка по свойствам к системам, имеющим астатизм 2-го порядка. ЛАХ 3-го типа отличается от ЛАХ 2-го типа лишь тем, что на частотах $\omega_1<\omega<\omega_2$ наклон участка ЛАХ составляет 60 дБ/дек, а следящая система близка по свойствам к системам с астатизмом 3-го порядка. Наклон участка ЛАХ любого типа в районе частоты среза ω_c (частота, на которой коэффициент усиления разомкнутой системы равен 1) всегда должен быть равен 20 дБ/дек.

Добротность Q при построении ЛАХ разомкнутой следящей системы описывается значением высоты перпендикуляра $g=20\lg Q$, восстанавливаемого в точке $\omega=1$ 1/с, через конец которого проводится прямая с наклоном 20 дБ/дек в низкочастотном участке ЛАХ.

Основные характеристики, обеспечивающие качество функционирования следящих систем, определяются параметрами элементов, составляющих замкнутый контур системы. В процессе эксплуатации автоматических устройств выделения измеряемого параметра элементы, составляющие замкнутый контур следящих систем, подвергаются старению, замене, кроме того, изменяется характер входного воздействия в каждом конкретном случае и т. п. Эти причины вызывают необходимость проверки и настройки следящих систем таким образом, чтобы их основные характеристики, а также параметры переходной характеристики и АЧХ удовлетворяли бы требованиям, определяемым техническими условиями.

15.2. СНЯТИЕ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА

Переходная характеристика следящей системы снимается осциллографированием выходного сигнала системы при скачкообразном изменении входного воздействия. Для этого используются либо предусмотренные конструкцией схемы «скачка», либо приборы для снятия переходных характеристик и осциллограф с большим временем послесвечения экрана и с однократной разверткой, запускаемой синхронно со схемой «скачка» или с прибором снятия переходных характеристик. Если запас устойчивости системы слишком велик, то отработка «скачка» происходит слишком медленно по апериодическому закону (рис. 15.1, кривая *1*). Для неустойчивых систем воздействие «скачка» приводит к возникновению незатухающих колебаний, что также недопустимо (рис. 15.1, кривая *3*). Поэтому в условиях эксплуатации настройкой параметров следящей системы стремятся обеспечить отработку «скачка» по закону быстрозатухающих колебаний (рис. 15.1, кривая *2*).

По переходной характеристике определяются следующие показатели переходного режима (рис. 15.1):

— время нарастания $t_{нр}$ переходной характеристики до значения $H(t)=1$;

— время установления $t_{рег}$, после которого переходная характеристика отличается от значения $H(t)=1$ не более, чем на заданную величину n (обычно $n=0{,}05$);

— величина перерегулирования (переколебаний), под которым понимают максимальное относительное отклонение переходной характеристики от значения $H(t)=1$, $\delta_{прг}=(H_1-1)\cdot 100\%$ (допустимые значения $\delta_{прг}$ находятся в пределах 20 ... 40%);

— декремент затухания колебаний $\Delta_{зтх}=(H_2-1)/(H_1-1)$;

— число колебаний за время установления $t_{рег}$ $n_{клб}=t_{рег}/T_{клб}$ (обычно стремятся получить $n_{клб}=1/2$ ... 3).

Переходная характеристика следящей системы снимается при всех положениях регулировки обратной связи (если такая имеется). При этом интересуются изменением таких показателей переходного режима, как время установления, величина перерегулирования и число колебаний за время установления. По результатам измерений определяется положение регулировки обратной связи, при котором следящая система удовлетворяет требуемым критериям настройки.

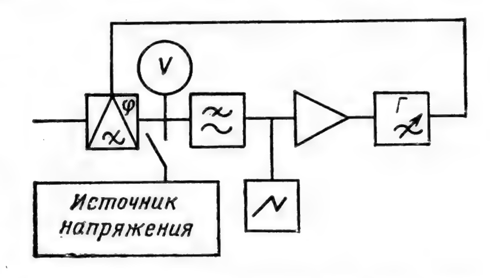


Рис. 15.3. Функциональная схема для снятия переходной характеристики пропорционально интегрирующего фильтра.

Для следящих систем, основанных на схемах фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), кроме снятия переходной характеристики замкнутого контура ФАПЧ, исследуют переходную характеристику линейной части, в частности, переходную характеристику фильтра нижних частот (ФНЧ) — пропорционально интегрирующего фильтра.

Параметры пропорционально интегрирующего фильтра определяют полосу пропускания ФАПЧ и уровень динамических и случайных ошибок.

Снятие переходной характеристики ФНЧ производится с целью определения его реакции на единичный «скачок» напряжения. Методика снятия переходной характеристики пропорционально интегрирующего фильтра предусматривает подачу на вход ФНЧ «скачка» напряжения постоянного тока (рис. 15.3) при выключенном питании схемы ФАПЧ и наблюдение реакции включения напряжения на экране осциллографа. По снятой переходной характеристике ФНЧ определяется, в основном, время установления. При необходимости, изменением параметров пропорционально интегрирующего фильтра, добиваются удовлетворения требованиям, определяемым техническими условиями.

15.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ, ДОБРОТНОСТИ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ОШИБКИ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ

В выражении главного комплексного коэффициента усиления замкнутой системы регулирования

$$K_{уз}=A(\omega)\exp jf(\omega)$$

$A(\omega)$ и $f(\omega)$ являются действительными функциями частоты ω. Эти функции называются частотными характеристиками замкнутой системы

автоматического регулирования. Им присвоены следующие наименования:

— $A(\omega)$ — амплитудная частотная характеристика (АЧХ) или просто амплитудная характеристика;

— $f(\omega)$ — фазовая частотная характеристика или просто фазовая характеристика.

АЧХ следящей системы снимается путем осциллографирования выходного сигнала системы при изменении частоты и амплитуды входного воздействия. Для этого используются приборы снятия АЧХ, которые представляют собой датчики синусоидального напряжения, частота и амплитуда которых могут изменяться в определенных пределах.

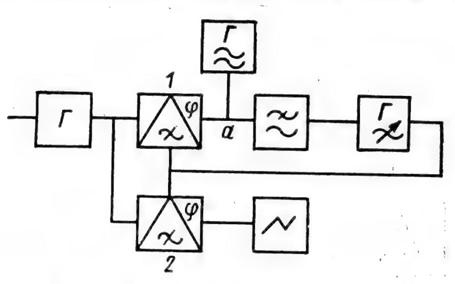


Рис. 15.4. Функциональная схема для снятия частотной характеристики контура ФАПЧ.

При снятии АЧХ, например, замкнутой системы необходимо убедиться в том, что следящая система замкнута. Все симметричные каскады, входящие в следящую систему, должны быть сбалансированы, после чего на вход следящей системы можно подавать от прибора снятия АЧХ напряжения различных частот и оценивать ее реакцию. Необходимо снимать несколько АЧХ системы при разных положениях регулировок усиления и обратной связи (если такие в схеме предусмотрены). В результате снятия АЧХ следует подобрать такие положения указанных регулировок, при которых следящая система имеет оптимальные для требуемых условий функционирования форму АЧХ и значение полосы пропускания системы.

Полоса пропускания замкнутой следящей системы ω_0 (рис.15.2,*а*) определяется на уровне 0,707 (—3 дБ) АЧХ, а полоса пропускания разомкнутой следящей системы ω_c (рис. 15.2,*б*) — на уровне 1 (0 дБ).

При проверках и настройках следящих систем с использованием АЧХ полезно помнить, что максимум АЧХ (рис. 15.2,*а*) $A_{макс}$ и полоса частот, пропускаемых системой ω_0, являются важными косвенными критериями, по которым судят о переходной характеристике замкнутой системы. Увеличение $A_{макс}$ соответствует перерегулированию в переходном процессе (значение $A_{макс}$ наиболее тесно связано с величиной перерегулирования). Кроме того, если при одной и той же форме АЧХ уменьшить в n раз полосу пропускаемых следящей системой частот, то время установления увеличивается в n раз и наоборот.

Непосредственно снятие АЧХ следящих систем, основанных на схемах ФАПЧ, затруднительно, поскольку сам контур ФАПЧ отрабатывает частотное рассогласование. Однако определить АЧХ можно косвенным образом. Для этого к точке *а* схемы, изображенной на рис. 15.4, подключается звуковой генератор (ЗГ), причем амплитуда напряжения ЗГ выбирается много меньше амплитуды сигнала. Действие колебаний с выхода ЗГ приведет к фазовой модуляции колебаний управляемого генератора. Измеряя степень этой модуляции, например осциллографическим способом, в зависимости от частоты ЗГ удается снять АЧХ следящего фильтра. Фазовый детектор *2* (на схеме рис. 15.4) является измерительным.

Для измерения добротности следящая система размыкается. При помощи имитатора вводится сигнал ошибки определенной величины, обусловливающий либо требуемую скорость и направление вращения антенны в автоматических устройствах выделения сигнала отклонения от равносигнального направления (в системах измерения угловых координат), либо необходимую скорость и направление движения строба в автоматических устройствах выделения временного положения импульсного сигнала (в системах измерения расстояния). Величина добротности представляет собой отношение либо угловой (постоянной) скорости вращения антенны, либо скорости (постоянной) движения строба к напряжению сигнала ошибки $Q=\dot{q}/U_{сг}$.

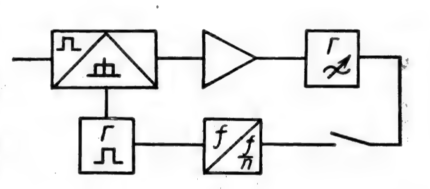


Рис. 15.5. Функциональная схема следящей системы.

Измерение величины добротности Q следует производить при различных положениях регулировки усиления (если такая имеется). Значение угловой скорости вращения антенны или скорости движения строба ($\dot{q}$) для каждого положения регулировки усиления представляет собой среднее арифметическое двух значений при вращении антенны или движении строба в одну и другую сторону. По результатам измерений определяется положение регулировки усиления, при котором следящая система имеет необходимую добротность для требуемых условий функционирования.

Добротность следящих систем, основанных на схемах фазовой автоподстройки частоты, в атоматических устройствах выделения частоты и фазы гармонического сигнала (в системах измерения скорости, расстояния и угловых координат) численно равна полосе удержания [44]. $Q=\Delta\omega_{уд}$.

При настройке следящих систем иногда прибегают к определению основных характеристик отдельных каскадов, которые с одной стороны позволяют произвести настройку этих каскадов, а с другой — оценить их динамические свойства и системы в целом. Так, определение коэффициентов преобразования отдельных звеньев дает возможность найти добротность следящей системы.

Добротность следящей системы, функциональная схема которой представлена на рис. 15.5, выражается произведением коэффициентов преобразования отдельных каскадов

$$Q=K_{вд}K_{эи}K_{уг}, \qquad (15.1)$$

где $K_{вд}$ — коэффициент преобразования временного дискриминатора; $K_{эи}$ — коэффициент преобразования электронного интегратора; $K_{уг}$ — коэффициент преобразования управляемого генератора.

Если в схему следящей системы включены катодные повторители, то в выражении для добротности (15.1) необходимо учитывать значения их коэффициентов усиления.

Располагая реальным значением добротности следящей системы Q и скоростью изменения измеряемого параметра, можно определить динамическую (скоростную) ошибку системы. Реальная динамическая (скоростная) ошибка следящей системы описывается формулой $l=\dot{q}/Q$.

Динамическая ошибка определяется для нескольких значений скорости изменения измеряемого параметра $\dot{q}$ при замкнутой следящей системе. Требуемая скорость изменения измеряемого параметра (в сторону увеличения ее и в сторону уменьшения) задается от имитатора, при этом об установленной скорости судят по скорости перемещения световой отметки на индикаторах, по индикаторным шкалам или по данным приборов цифропечати.

15.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЛУЧАЙНОЙ ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЯ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ

Определение случайной ошибки измерения рассмотрим на примере следящих систем, основанных на схеме фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Для нахождения среднеквадратического значения фазовой ошибки в зависимости от интенсивности помехи может быть использована схема, приведенная на рис. 15.6. Квадратичный вольтметр *V1* позволяет

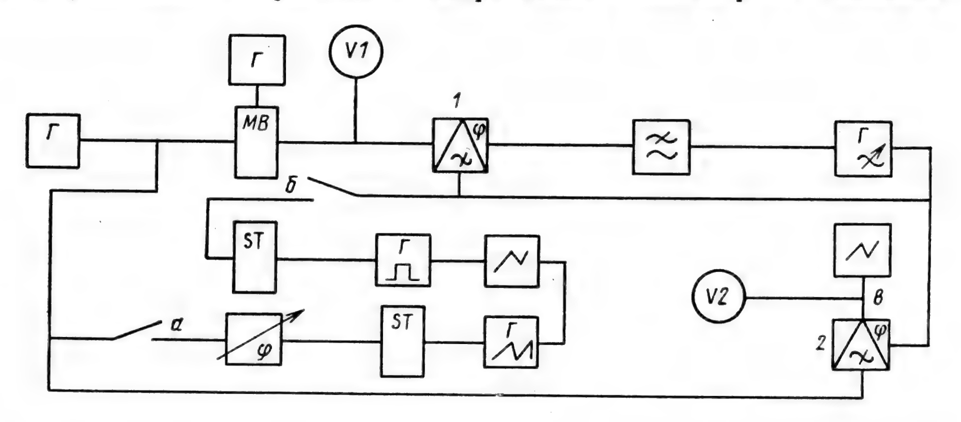


Рис. 15.6. Функциональная схема для определения среднеквадратического значения флюктуации фазы.

определить мощность сигнала и мощность шумов на входе контура ФАПЧ. Фазовый детектор ФД-2 является измерительным. Среднеквадратическое значение флюктуации фазы определяется на выходе ФД-2 по показаниям квадратичного вольтметра *V2* при разных отношениях сигнал/шум на входе. Перед измерениями должна осуществляться калибровка ФД-2 и *V2*.

Для этого, изменяя частоту генератора сигналов при отключенном генераторе шумов, необходимо определить максимальные значения напряжения на выходе ФД-2, которые будут соответствовать изменению разности фаз между колебаниями управляемого генератора и генератора сигналов на $\pm 0{,}5\pi$.

Подобную схему, если вместо квадратичного вольтметра *V2* подключить к точке *в* осциллограф, можно использовать для осциллографического снятия одномерной плотности вероятности разности фаз. В этом случае, если на одну пару отклоняющих пластин осциллографа подать случайно изменяющееся напряжение $q(t)$, то на экране образуется случайная развертка. Если $q(t)$ — стационарный процесс, то средняя яркость свечения экрана в каждой точке этой развертки пропорциональна плотности вероятности. Фотографирование такой осциллограммы и последующее фотометрирование снимка позволяют построить закон распределения. Однако нелинейные свойства фотоматериалов усложняют обработку результатов. Проще регистрировать значения средней яркости

свечения экрана, помещая последовательно различные участки случайной развертки против диафрагмы фотоумножителя, показания которого пропорциональны средней яркости.

Более точный способ определения одномерной плотности вероятности разности фаз с использованием принципа тройного управления электронным лучом [43, 44] состоит в том, что к точкам *а* и *б* схемы, представленной на рис. 15.6, подключается устройство, состоящее из фазовращателя, двух триггеров, схемы формирования пилообразного напряжения, генератора импульсов и осциллографа. Опорный сигнал от генератора сигналов запускает триггер, вырабатывающий последовательность прямоугольных импульсов. Фронтом этих импульсов запускается генератор пилообразного напряжения, напряжение с выхода которого поступает на вход *Y* вертикального усилителя осциллографа. Фаза пилообразного напряжения жестко связана с фазой опорного сигнала, а амплитуда пилы составляет 2π радиан. Из колебаний управляемого генератора после триггера и генератора импульсов образуются короткие импульсы, жестко связанные с фазой колебаний управляемого генератора, подаваемые на вход канала яркости *Z*.

В результате модуляции по яркости на осциллограмме пилообразного напряжения выделяется ярко светящаяся точка. Фазовращатель позволяет перемещать положение этой точки по отношению к началу пилообразной развертки. При включенном генераторе шумов светящаяся точка случайным образом начинает перемещаться по пилообразной развертке. При этом имеется возможность видеть даже перескоки фаз при малых отношениях сигнал/шум. При перескоках светящаяся точка выходит за пределы пилообразной развертки и вновь появляется с противоположной стороны. Уменьшив до нуля усиление по горизонтали и добившись регулировкой яркости пропадания пилообразной развертки, можно наблюдать линию, образованную перемещением светящейся точки, яркость которой пропорциональна распределению плотности вероятности разности фаз. Величина яркости свечения линии в каждой точке измеряется, если светящаяся линия перемещается вдоль узкой диафрагмы фотоумножителя.

Описанная методика дает возможность определить перескоки фаз, выяснить воздействие на контур ФАПЧ модулированных сигналов, гармонических и других помех.

15.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОС УДЕРЖАНИЯ И СХВАТЫВАНИЯ КОНТУРА ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

ФАПЧ в целом устройство нелинейное. Нелинейное устройство характеризуется пороговыми свойствами, т. е. способностью нормально функционировать только в некоторых допустимых пределах изменения параметров сигнала и при достаточно высоком отношении сигнал/шум на входе устройства. Из-за нелинейности системы ее полосы удержания и схватывания ограничены и не равны друг другу.

Для определения полос удержания и схватывания контура ФАПЧ используется схема, представленная на рис. 15.7.

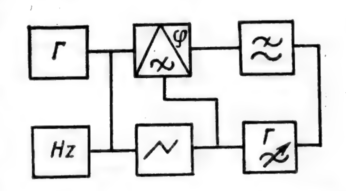


Рис. 15.7. Функциональная схема для определения полос удержания и схватывания контура ФАПЧ.

Сигналы с выхода генератора сигналов и управляемого генератора контура ФАПЧ подаются соответственно на горизонтальные и вертикальные пластины осциллографа. Условие синхронизации контура ФАПЧ оценивается по фигуре Лиссажу. Значение полосы удержания при симметричной перестройке управляемого генератора от номинального значения определяется как $\Delta\omega_{уд}=0,5(\omega_1-\omega_2)$, где ω_1 и ω_2 — частоты генератора сигналов, при которых происходит пропадание фигуры Лиссажу на экране осциллографа. Расстройка генератора сигналов производится от номинальной частоты управляемого генератора в разные стороны.

Полоса схватывания $\Delta\omega_{схв}$ определяется при использовании той же схемы (рис. 15.7) по формуле

$$\Delta\omega_{схв}=0{,}5(\omega'_1-\omega'_2).$$

Здесь ω'_1 и ω'_2 — частоты генератора сигналов, при которых появляется фигура Лиссажу на экране осциллографа при изменении частоты генератора сигналов к номинальной частоте управляемого генератора со стороны бо́льших и меньших частот по отношению к номинальной частоте управляемого генератора. Точное определение частот ω_1, ω_2, ω'_1 и ω'_2 целесообразно производить с помощью электронного частотомера, работающего на принципе счета числа нулей.

Глава 16

РЕГИСТРИРУЮЩИЕ И ПРЕОБРАЗУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА РТС

16.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕГИСТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ

Наиболее важным в режиме применения РТС являются процессы представления информации, к которым относятся сигнализация, индикация, регистрация и комплексное отображение информации на табло и экранах различных типов. Большое значение среди этих процессов имеет регистрация, т. е. запись принимаемой информации на материальных носителях в форме видимых или скрытых изображений (документирование).

Необходимость и важность регистрации объясняется большими скоростями передачи информации, широким диапазоном потребной длительности работы, требованием регистрации в наглядной форме и в форме, пригодной для ввода в ЭВМ, необходимостью сохранения принятой информации с целью ее дальнейшего использования при анализе результатов работы.

Естественно, что какой-либо один универсальный тип регистрирующего устройства не может полностью удовлетворять всем перечисленным требованиям. Отсюда и многообразие видов регистрирующих устройств, используемых в составе РТС.

По месту установки регистрирующие устройства делятся на бортовые и наземные. Бортовые устройства могут быть автономными регистрирующими устройствами либо запоминающими устройствами, регистрирующими информацию во время отсутствия связи с наземными станциями, которая передается на Землю после установления радиосвязи.

По типу регистрируемых сигналов устройства разделяются на устройства регистрации аналоговых данных и устройства регистрации дискретных данных.

На практике наиболее широко используются магнитные регистрирующие устройства с записью сигналов на магнитной ленте или проволоке, графические регистрирующие устройства, с записью сигналов на электротермической, электрохимической или на металлизированной бумагах, а также фоторегистраторы с записью сигналов на фотопленке. Реже используются регистраторы с записью сигналов на обычной бумажной ленте.

В наземной радиотелеметрической станции, в системах орбитальных измерений и в РТС, работающих с космическими объектами, магнитные регистрирующие устройства и графические регистраторы являются неотъемлемой частью аппаратуры этих средств.

В зависимости от назначения, вида и объема принятая информация используется либо непосредственно по прямому назначению (оперативная информация), либо подлежит последующей обработке с целью ее автоматического «редактирования» или построения на ее основе графических и табулированных зависимостей, необходимых для представления и анализа содержания информации. В частности, в радиотелеметрических средствах и системах траекторных измерений принятая информация всегда подвергается обработке на специализированных или универсальных ЭВМ.

16.2. ПРОВЕРКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ РЕГИСТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В магнитных регистрирующих устройствах наиболее широкое распространение получили ленты типа 2,6 и 10 шириной от 6,35 до 50,8 мм и длиною до 1000 ... 2000 м.

В свободном состоянии магнитная лента представляет собой плоскую полосу с ровными краями. Деформации ленты по ширине (коробление) и по длине (сабельность) ухудшают ее контакт с магнитными головками и приводят к перекосам ленты относительно головок. Все это увеличивает волновые потери при записи и при воспроизведении. Кроме того, ухудшается качество намотки ленты в кассетах.

Рабочие свойства магнитных лент характеризуются чувствительностью к полезным сигналам в процессе записи, возможными искажениями сигнала в процессе записи и воспроизведения, шумами ленты, копирэффектом, стираемостью и др.; характеристики рабочих свойств ленты приводятся в ее паспорте.

В зависимости от формы регистрации принимаемой информации (звукозапись, регистрация данных в аналоговой или цифровой форме) на качество записи будут влиять те или иные рабочие свойства.

Для получения качественной записи и воспроизведения необходимо применять соответствующий тип ленты, указанный в инструкции по эксплуатации магнитофона. Каждый тип ленты требует определенного режима записи, который обусловливается конструктивными особенностями магнитного регистрирующего устройства.

При прохождении по тракту лентопротяжного механизма регистрирующих устройств магнитная лента подвергается механическим воздействиям, которые имеют наибольшее значение в моменты пуска, остановки и ускоренной перемотки. Кроме того, вследствие трения рабочего слоя ленты о магнитные головки происходит их взаимный износ. Исходя из возникающих механических нагрузок, к ленте предъявляются соответствующие требования по физико-механическим свойствам, к которым относятся: механическая прочность, адгезионная прочность, абразивность (показатель степени износа магнитных головок и других неподвижных деталей лентопротяжного механизма, с которым соприкасается лента в процессе движения), теплостойкость и влагостойкость.

При бережном отношении и соблюдении правил хранения магнитных лент, записанная на них информация может сохраняться в течение длительного времени. Ухудшение физико-механических и рабочих свойств лент происходит в первую очередь из-за изменений свойств основы, в то время как магнитные свойства лент практически не изменяются даже при длительном хранении.

Магнитная лента должна храниться в исправной упаковке (полиэтиленовом герметическом чехле) завода-изготовителя. Чехол следует вскрывать только перед установкой ленты на лентопротяжный механизм регистрирующего устройства. При наличии антимагнитных контейнеров пленка хранится в них и извлекается только непосредственно перед установкой кассет в регистрирующие устройства. Условия хранения должны исключать резкие изменения температуры и относительной влажности воздуха. Рекомендуется хранить ленту в помещении с температурой 10...20 °C и относительной влажностью воздуха 50...60%. Воздух должен быть свободным от пыли и других загрязняющих примесей. Недопустимой является температура выше 30 °C. Используемый запас магнитных лент в чехлах в течение необходимого времени обычно хранится в холодильниках, придаваемых РТС с устройствами магнитной регистрации. Хранение при температуре ниже 10 °C не рекомендуется. В случае хранения

при влажности воздуха ниже рекомендуемой лента становится хрупкой. Для восстановления эластичности необходимо выдержать ленту некоторое время при рекомендуемой влажности. Резкие колебания температуры и влажности при хранении ленты недопустимы, так как лента приобретает склонность к скручиванию и короблению.

Лента должна храниться намотанной на стандартный сердечник с натяжением 500...600 г. При этом намотка должна быть ровной, без выступающих витков. Лента в полиэтиленовых чехлах укладывается в картонные коробки, которые, на стеллажах располагаются в вертикальном положении. Маркировка, нанесенная на коробку, обозначает: первые две цифры — месяц выпуска, следующие пять—номер партии, последующие четыре цифры — заводские рабочие номера.

Не допускается хранение ленты вблизи крупных железных масс или сильных электромагнитных полей. Лента должна находиться вдали (не менее 3 м) от нагревательных приборов. Ленту также следует защищать от воздействия ударных нагрузок и вибраций. Заправка ее в регистратор, запись и воспроизведение должны проводиться согласно инструкции по эксплуатации магнитофона. Не допускается чрезмерное натяжение ленты при пуске и остановке лентопротяжного механизма, применение деформированных кассет, а также неправильный выбор натяжения. Все части лентопротяжного механизма, соприкасающиеся с лентой, следует очищать после каждой смены катушки.

Если во время работы происходит обрыв ленты, то ее следует разделить на две части. Склеивание не рекомендуется. Производить рабочие записи на склеенной магнитной ленте запрещается. В крайнем случае допускается временное склеивание ленты. Для этого рекомендуется применять клей в зависимости от основы в соответствии с табл. 16.1.

Таблица 16.1

Вид основы	Составные компоненты клея	Масса, г
Диацетатная	Уксусная кислота —98% Ацетон Бутилацетан	23,5 63,5 13
Триацетатная	Диоксан Ацетон	50 50
Лавсановая	Дихлорэтан Метиленхлорид Смола ТФ-37	76 73 8

Магнитные ленты могут склеиваться также с помощью специальных склеивающих лент встык со стороны основы.

Вид основы ленты определяется по номеру, нанесенному на рабочую сторону и представляющему собой: первые две цифры — год выпуска, последующие пять — номер партии, в котором первая цифра указывает вид основы; при цифрах 0, 1, 3 — лента на диацетатной основе, при цифрах 3 и более — на триацетатной. Магнитная лента тип 10 (тип 10А) выпускается на лавсановой основе.

Проверка работоспособности магнитных регистрирующих устройств производится двумя методами: контроль по входным и выходным параметрам и контроль работы по промежуточным параметрам. При первом методе контроля в основном проводятся проверки идентичности входных (регистрируемых) сигналов и выходных (воспроизводимых) сигналов. Контроль осуществляется с помощью осциллографических приборов стандартного типа или встроенного (входящего в состав аппаратуры) осциллографа.

Проверка правильности работы лентопротяжного механизма проводится на всех режимах работы (запись, воспроизведение, прямая и обратная перемотки) и на различных скоростях протяжки. При этом проверяются равномерность протяжки, работа автоматики и дистанционного управления. Магнитная лента при движении должна быть без перекосов и ровно наматываться в кассеты при всех скоростях протяжки. При обрыве ленты, а также при окончании ленты в падающей кассете лентопротяжный механизм должен немедленно автоматически останавливаться.

При подготовке к работе магнитных регистрирующих устройств контролируются токи записи и воспроизведения, которые не должны

превышать норм, записанных в технических условиях на аппаратуру.

В регистрирующих устройствах с цифровой формой записи с помощью контрольного осциллографа, обычно встроенного в аппаратуру, проверяется форма импульсов записи и воспроизведения. Наблюдаемая форма импульсов при правильной регулировке устройства должна совпадать с соответствующими эпюрами напряжений, представленными в технической документации.

В регистрирующих устройствах с многодорожечной записью сигналов проводится проверка правильности юстировки блока магнитных головок. Проверка производится на осциллографе, с помощью которого определяется временной сдвиг между сигналами верхней и нижней дорожек, которые были записаны одновременно. Этот временной сдвиг Δt не должен превышать значений, определенных техническими условиями (рис. 16.1).

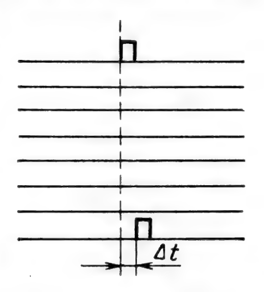


Рис. 16.1. Временной сдвиг в записи импульсов по верхней и нижней дорожкам.

Для проверки правильности юстировки блока головок используется специальная эталонная магнитная лента, которая обычно выполнена на металлическом основании. Если временной сдвиг Δt между записанными импульсами на верхней и нижней дорожках больше нормы, то с помощью специальных юстировочных винтов лентопротяжного механизма производится юстировка блока магнитных головок. Контроль правильности осуществляется по осциллографу путем определения величины временного сдвига.

Характерным недостатком работы магнитных регистрирующих устройств является неравномерность движения магнитной ленты по тракту лентопротяжного механизма при записи и воспроизведении записанных сигналов. Длительные изменения скорости движения ленты называются *статическими ошибками*, которые стремятся устранить применением различных автоматических корректирующих электронных схем в регистрирующих устройствах. Изменения скорости движения ленты на небольших интервалах называются *динамическими ошибками*, которые стремятся устранить главным образом правильным конструированием кинематической схемы лентопротяжного механизма.

Одним из источников погрешностей магнитной записи сигналов является лентопротяжный механизм, что обусловливается неравномерностью скорости протяжки ленты и изменением ее натяжения в процессе записи. Эти погрешности называются *детонацией*. Различают детонацию низкочастотную и высокочастотную. Величины их обычно указывают в технических характеристиках на магнитные регистрирующие устройства. Учет детонации имеет особо важное значение для систем, осуществляющих регистрацию ЧМ сигналов, поскольку полезная информация в таких системах заключена в частоте регистрируемых колебаний. На выходе регистрирующих устройств в этом случае детонация проявляется в виде шума.

Определение величины детонации лентопротяжного механизма производится с помощью стандартной магнитной ленты, на которую записана стабильная частота, определенная для каждой скорости протяжки. Эта частота записывается от генератора с кварцевой стабилизацией, а ее значение обычно выбирается несколько выше наибольшей регистрируемой частоты. При воспроизведении записи с такой ленты в резуль-

тате детонации получается частотно-модулированный сигнал. Демодулируя этот сигнал частотным дискриминатором по величине выходного напряжения, определяют значение детонации.

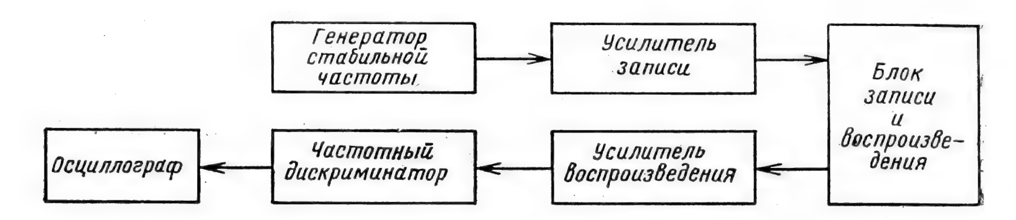


Рис. 16.2. Схема проверки детонации.

На практике определение детонации как параметра магнитного регистрирующего устройства производится по следующей схеме (рис. 16.2). Предварительно определяется дискриминационная характеристика частотного дискриминатора, зная которую, можно определить коэффициент преобразования величины изменения частоты на входе дискриминатора в величину выходного напряжения. Кроме того, производится калибровка усилителя вертикального отклонения осциллографа, по которой определяется величина отклонения луча на экране в зависимости от величины входного напряжения. При проверке воспроизведенный сигнал подается на частотный дискриминатор, с выхода которого сигнал через полосовой фильтр поступает на вход вертикального усилителя осциллографа, где на экране по отклонению луча определяется величина детонации. Детонация определяется в процентах от $\Delta f/f$. Полосовые фильтры на выходе частотного дискриминатора ставятся для того, чтобы измерять детонацию в требуемом частотном диапазоне. Таким образом определяется величина детонации по всей полосе записываемых сигналов.

16.3. ПРОВЕРКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГРАФИЧЕСКИХ РЕГИСТРАТОРОВ

В качестве носителей в графических регистрирующих устройствах РТС используются электротермическая, электрохимическая и металлизированная бумажные ленты, а в качестве регистрирующего органа применяются два электрода, один из которых выполнен в виде металлического валика, а второй представляет собой гребенку упругих платиновых или вольфрамовых иголок (перьев). Графические регистраторы являются устройствами открытой записи. В основе всех этих методов регистрации лежит способность веществ, нанесенных на носитель, под действием протекающего электрического тока изменять свою окраску (темнеть).

Основными недостатками электротермической бумаги являются значительная начальная оптическая плотность поверхностного слоя, низкий верхний предел оптической плотности как следствие этого невысокая разрешающая способность (до 2 ... 3 линий/мм) и узкий диапазон яркостных градаций изображения.

При эксплуатации графических регистраторов с записью на электротермическую бумагу следует иметь в виду, что этот способ требует сравнительно высоких напряжений 200 ... 250 В, поэтому при прохождении тока через бумагу имеет место частичное обжигание покрытия и распыление части бумаги у игольчатого электрода, что вызывает необходимость вентиляции самого регистратора и помещения из-за возможности образования дыма. Процесс обгорания бумаги усиливается

при чрезмерном поджатии перьев (игольчатых электродов) к бумаге.

Кроме того, при обращении с электротермической бумагой необходимо проявлять осторожность, так как в состав покрытия бумаги входят ядовитые химические вещества, попадание которых внутрь организма может привести к тошноте и рвоте.

Одной из особенностей применения электрохимической бумаги является осуществление записи при влажном состоянии бумаги. Поэтому для хранения электрохимической бумаги применяют герметичные хлорвиниловые пакеты. Вскрывать эти пакеты следует только перед непосредственным употреблением бумаги, так как при уменьшении влажности бумаги ниже 12 ... 15% величина проходящего через нее тока, резко падает и происходит нарушение качества записи.

Если электрохимическая бумага непосредственно выдается из регистратора, то достаточно ее естественной сушки на воздухе. Если же бумага наматывается в рулон, то необходимо включать в работу процесс сушки, иначе отпечатки с одного слоя бумаги в результате диффузии перейдут на соседний слой.

Проверка и эксплуатация записывающих электродов в графических регистраторах сводится к следующему. При правильной эксплуатации износ перьев незначителен. В результате неправильной или небрежной эксплуатации может возникнуть неравномерный износ отдельных перьев. Это происходит в случае установки линии концов перьев непараллельно образующей цилиндра (второй пишущий электрод).

Для устранения неравномерного износа отдельных перьев производят обрезку перьев с помощью приспособления, представляющего из себя ножницы типа гильотины. В процессе эксплуатации при записи происходит износ металла барабана под перьями. В результате чего на нем образуются риски. После записи 25...30 рулонов бумаги глубина рисок достигает примерно 0,1 мм. В этом случае производят замену барабана новым из ЗИП либо на токарном станке производят обточку и шлифовку старого барабана. После смены или установки нового барабана необходимо проверить динамометром степень поджатия перьев к барабану. Контактное давление перьев должно соответствовать значению, записанному в технических условиях.

При автономной проверке лентопротяжного механизма во время протяжки бумаги недопустимо заминание ее под гребенкой. Проверка осуществляется на всех режимах работы и при всех скоростях протяжки.

Работоспособность графического регистрирующего устройства в целом осуществляется путем проведения контрольных записей, которые производятся совместно с работой РТС при включении имитатора сигнала. Контроль производится в различных режимах работы изменением скорости протяжки и точности регистрации информации на ленте. При этом обращается внимание на контрастность, линейность записи, наличие служебных меток и меток времени. Если на графическое устройство для записи выводится не весь объем информации, принимаемой РТС, то проверяется работа программно-коммутирующих устройств, осуществляющих выбор регистрируемого объема информации по заданной программе. Обычно в состав графических устройств входят несколько записывающих блоков, поэтому при контроле программно-коммутирующих устройств проверяется правильность распределения информации по блокам записи и по дорожкам записи на бумажной ленте.

16.4. ПРОВЕРКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОТОРЕГИСТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В используемых на практике фоторегистрирующих устройствах запись информации на фотопленку осуществляется с помощью электронно-лучевых трубок или специальных шлейфов. Преимущество фоторегистраторов перед графическими заключается в весьма большой скорости регистрации, высокой точности передачи изображений, в возможности регистрации сигналов в любой символике и в отсутствии механического взаимодействия между носителем (пленкой) и регистрирующим органом. Недостаток — наличие дополнительной обработки пленки (проявление и закрепление изображений). На пленку, помимо регистрации принимаемых сообщений, производится запись дополнительной информации, облегчающей процесс дешифрации результатов записи, например, метки времени и значения градуировочной характеристики радиотехнических средств. В качестве пленки в фоторегистраторах часто используется обычная 35-мм фотопленка.

В связи с трудностью получения больших величин экспозиций, в фоторегистрирующих устройствах используются фотопленки с высокой светочувствительностью. Время экспозиции на практике выбирается экспериментально, исходя из качества люминофорного покрытия экрана трубки, чувствительности пленки и характера регистрирующих сигналов. С помощью обычных электронно-лучевых трубок при использовании пленки чувствительностью 100 ед. ГОСТ, можно записать импульсы длительностью до единиц микросекунд.

В РТС на фоторегистрирующие устройства выводится большой объем информации при достаточно продолжительном времени непрерывной регистрации, поэтому объем экспонированной фотопленки за время работы системы весьма велик. В то же время продолжительность обработки пленки по проявлению и закреплению результатов записи должна быть минимальной, чтобы без задержки использовать зарегистрированную информацию. Для этого приходится применять механизированные средства фотографической обработки пленки, т. е. специальные проявочные машины. Обработку пленки в машине можно проводить в незатемненном помещении при температуре окружающей среды 10 ... ... 35°С.

Проверка работоспособности фоторегистрирующих устройств проводится двумя методами: автономный контроль и проведение контрольной записи при совместной работе с РТС, в состав которых входит данный фоторегистратор.

При автономной проверке фоторегистратора проверяется техническое состояние оптической системы, работа лентопротяжного механизма, электронно-лучевой трубки или шлейфа. Производится регулировка яркости, фокусировки, масштаба и граничных положений светящихся точек на экране трубки. Яркость точек экрана грубо устанавливается с помощью специального прибора, измеряющего величину яркости. Показания этого прибора должны соответствовать значениям, указанным в технических условиях. Затем производится тщательная оптическая фокусировка при помощи специального приспособления.

При проверке лентопротяжного механизма проверяется его работа при различных скоростях протяжки, а также функционирование автоматики механизма сигнализации хода и обрыва фотопленки. Помимо это-

го, производится контроль величины момента трения фрикциона приемной кассеты.

Проведение контрольных записей на фоторегистраторе является составной частью комплексной проверки работоспособности радиотехнических средств при подготовке их к применению по целевому назначению. Обычно сигналы на систему подаются от имитатора сигналов. При этом путем подачи на вход системы определенных значений величины сигналов и по результатам регистрации выходных сигналов определяется линейность РТС в целом с тем, чтобы при дешифрации записей можно было бы учесть влияние системы на принимаемую и регистрируемую информацию. Особенно это важно знать, если радиотехнические средства служат для приема информации в аналоговой форме. При дешифрации с помощью градуировочных характеристик производят преобразование записанных величин сигналов в значения функций времени, каждая из которых должна как можно точнее отражать изменения физического параметра, информацию о котором передают и регистрируют в РТС.

В информационно-измерительных системах используются два вида градуировочных характеристик: градуировочная характеристика каждого преобразователя неэлектрической величины в электрическую и градуировочная характеристика системы. При автоматизированной обработке результатов регистрации с помощью различных вычислительных устройств при дешифрации используется также градуировочная характеристика этих регистрирующих устройств.

Во всех информационно-измерительных системах в качестве меры выбираются источники стабильных напряжений. Однако на практике величины этих эталонных напряжений для каждого конкретного источника могут отличаться друг от друга. Кроме того, в момент измерения часто неизвестен номинал эталонного напряжения. Чтобы исключить зависимость полученных данных от значений эталонного напряжения, пользуются относительными значениями величины эталонного напряжения (0% ... 100%). Градуировочные характеристики снимаются как функция относительных значений величины эталонного напряжения или относительного значения входного сигнала. Поэтому и уровни сигнала, подаваемого от имитатора, измеряются в относительных значениях.

При проведении как контрольных, так и рабочих записей на носитель во всех типах регистрирующих устройств наносятся: номер РТС и регистратора, если их несколько в составе станции и они работают одновременно; дата работы; характер записи; характер источника информации.

По окончании проведения записи носители зарегистрированной информации извлекаются из регистрирующих устройств и поступают на обработку полученной информации. Фотопленка предварительно подвергается фотохимической обработке. В настоящее время материалы открытой записи на различных типах бумажных лент, а также проявленные фотопленки подвергаются ручной обработке.

Процесс ручной обработки состоит в следующем. Вначале путем визуального просмотра материалов регистрации контролируется качество записи, наличие и количество сбоев, наличие меток времени и других вспомогательных меток. При записи на носителе нескольких параметров на одной дорожке регистрации производят разметку, т. е. на протяжении всей пленки наносят условные обозначения каждого записанного параметра. После этого производят непосредственное снятие отсчетов амплитуды зарегистрированных данных. Снятие данных производится с помощью специальных приборов различного типа.

Так, например, для считывания со стандартных фотопленок шириной 35 и 16 мм применяется прибор «Микрофот». Он представляет собой проектор настольного типа и позволяет в зависимости от используемого объектива получить 10- или 16-кратное увеличение.

По полученным отсчетам строят график зависимости величины зарегистрированного сигнала в мм от величины входного сигнала в относительных единицах (%). Такая зависимость, совместно с градуировочной характеристикой преобразователя неэлектрической величины в электрическую, используется для дешифрации записанных данных.

Процесс считывания записанных данных с электротермических, электрохимических и металлизированных бумажных лент аналогичен рассмотренному выше. Для этого применяются специализированные считывающие устройства других типов, в которых также имеется базовая линия и измерительная шкала прибора для снятия отсчетов.

16.5. ПРЕОБРАЗУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА И КОНТРОЛЬ ИХ ПАРАМЕТРОВ

В большинстве существующих РТС оконечными устройствами, с которых производится считывание информации оператором, являются различные типы индикаторных, отображающих и регистрирующих устройств. Принцип действия этих устройств основан на использовании различных сигналов, отличающихся формой и величиной. Снимаемые с выходов приемников радиотехнических средств сигналы перед подачей их на входы оконечных устройств подвергаются декодированию, кодированию и преобразованию. Преобразование, обработка и распределение принимаемых сигналов происходят таким образом, чтобы они представлялись в форме, удобной для использования в индикаторных и отображающих устройствах, или для записи в регистрирующих устройствах.

Ввиду отсутствия единой терминологии на устройства, выполняющие функции преобразования, распределения, кодирования и декодирования сигналов, они называются либо преобразующими, либо декодирующими (кодирующими), а иногда определяются общим понятием — преобразующее и декодирующее устройство. В многоканальных РТС с временным разделением каналов в состав преобразующих и декодирующих устройств, кроме того, включаются распределительные (коммутирующие) и синхронизирующие устройства. А в системах с частотным разделением каналов в состав преобразующего устройства входит набор полосовых фильтров. В состав устройств синхронизации РТС входят различные схемы ФАП, имеющие в своем составе управляемые генераторы.

Проверка параметров преобразующих и декодирующих устройств осуществляется автономно или комплексно в составе РТС. При автономных проверках на вход преобразующих и декодирующих устройств подаются определенные сигналы и производится анализ работы схем и узлов при их воздействии. Иногда эти воздействия называют стимулирующими или просто стимулами. Часто для целей проверки на вход устройства подаются специальные тест-сигналы, генерируемые имитаторами сигналов, входящими в состав аппаратуры РТС в виде блока эталонных сигналов.

Формируемые в этих блоках сигналы и являются испытательными тест-сигналами. Для этого используются генераторы со стабильной или управляемой частотой, а также стабилизированные источники э. д. с.

В зависимости от метода проведения проверок в процессе работы РТС по целевому назначению или в процессе проверки работоспособности различают два вида стимулирующих воздействий. В первом случае тест-сигналы поступают на вход РТС совместно с передаваемыми информационными сигналами. По их искажению судят о работе системы в целом. Во втором случае тест-сигналы поступают на вход РТС или непосредственно на вход преобразующего и декодирующего устройства при отсутствии на входе системы других сигналов.

Контроль технического состояния и работоспособности преобразующих и декодирующих устройств как при автономных, так и при ком-

плексных проверках системы в целом, в основном осуществляется путем сравнения форм сигналов в контрольных точках устройства, просматриваемых с помощью осциллографических приборов, с эпюрами напряжений этих точек схемы, представленными в технической документации. Кроме этого, в зависимости от конструктивного решения, контроль может производиться путем считывания показаний индикаторов и различных измерительных приборов. Анализ работы кодирующих и декодирующих блоков преобразующих устройств проводится путем считывания показаний счетчиков импульсов и сравнения этих показаний со значениями, определенными в технических условиях для данной величины стимулирующего сигнала. Частоту следования запускающих и синхронизирующих импульсов различных устройств, их форму и длительность, а также частоты задающих генераторов, обычно контролируют с помощью наблюдений на экранах осциллографических приборов, сравнивая результаты наблюдений с эпюрами напряжений, изображенными в технической документации.

При наличии расхождений по любому пункту инструкции по эксплуатации приступают к детальной проверке данного блока с помощью электронных измерительных приборов, находящихся в комплекте ЗИП. Объем и характер последующих проверок в этом случае определяется типом контролируемого блока, характером неисправности и наличием измерительной техники.

Большинство технической документации, регламентирующей объем проверок, содержит перечень возможных неисправностей различных устройств и методы их устранения, которым и руководствуются в ходе проверки.

При проведении контрольных записей о работоспособности преобразующих и декодирующих устройств судят по результатам регистрации тест-сигналов.

Глава 17

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

17.1. ТИПЫ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Радиотехнические устройства и их элементы являются потребителями энергии как постоянного, так и переменного тока. Потребляемые ими мощности составляют величины от долей ватта до сотен киловатт при различных напряжениях и токах. Для большинства РТС, устройств или их элементов необходимы источники питания, стабилизированные по напряжению.

Источники электропитания представляют собой комплексы элементов, приборов и аппаратов, вырабатывающих электрическую энергию и преобразующих ее к виду, необходимому для нормальной работы радиоустройств.

Все источники электропитания можно разделить на две группы первичного и вторичного питания [4].

Источники первичного питания — устройства, преобразующие различные виды энергии в электрическую. К таким источникам относятся: электромашинные генераторы, электрохимические источники тока, термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи, фотоэлектрические преобразователи и атомные батареи, преобразующие соответственно

механическую, химическую, тепловую, световую энергию и энергию внутриатомного распада в электрическую.

Источники вторичного питания — устройства, преобразующие электрическую энергию одного вида в другой. К ним относятся: преобразователи переменного напряжения в постоянное (выпрямители), постоянного напряжения в переменное (инверторы), преобразователи величины переменного напряжения (трансформаторы), преобразователи частоты переменного тока (умножители и делители частоты) и многие др.

На практике применяются различные сочетания источников первичного и вторичного питания, образующие в совокупности различные системы электропитания.

Наиболее распространенной системой электропитания радиотехнической аппаратуры является система, состоящая из источника переменного напряжения и выпрямителей, преобразующих переменное напряжение источника в постоянное напряжение различной величины. В качестве источников переменного напряжения используются распределительные электрические сети энергетических систем, питающиеся от электрических станций с электромашинными генераторами или от автономных электромашинных генераторов. Выпрямитель является статическим преобразователем переменного тока в постоянный.

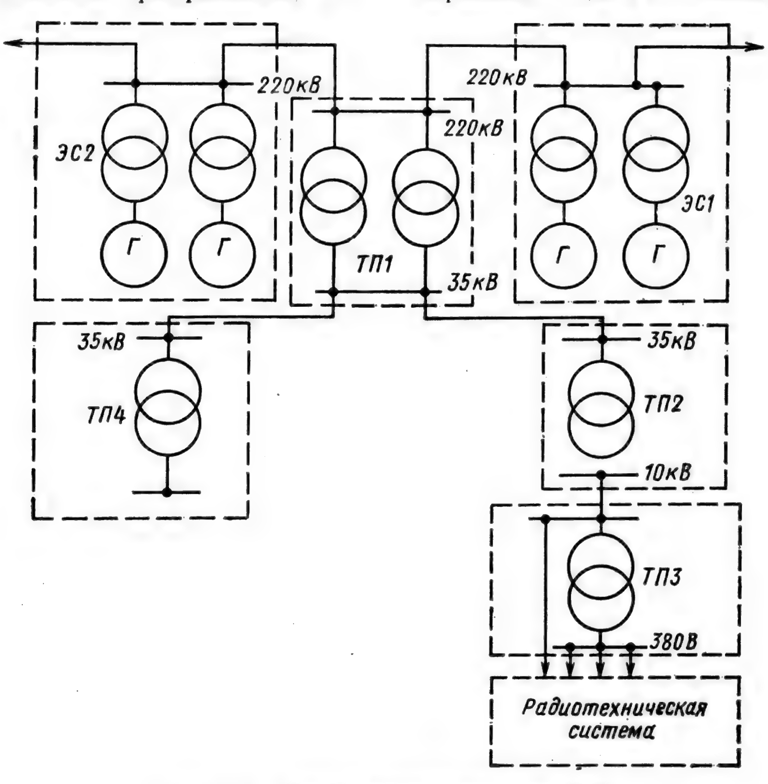


Рис. 17.1. Схема электроснабжения РТК.

Примерная схема, иллюстрирующая построение системы электроснабжения РТК, состоящей из электрических станций ЭС1 и ЭС2 и трансформаторных подстанций ТП1, ТП2, ТП3 и ТП4, связанных между собой линиями электропередачи (ЛЭП), приведена на рис. 17.1. Подобная схема применяется для электроснабжения мощных стационарных РТК, радиопередающих центров, радиолокационных станций и др. В этом случае подстанция ТП3 обычно размещается в одном здании с РТС и является ее неотъемлемой частью. Использование высоких напряжений и многократная их трансформация обеспечивают передачу больших мощностей на значительные расстояния при относительно малых потерях энергии в системе передачи и распределения электрической энергии. При небольших мощностях порядка нескольких десятков киловатт и менее

питание осуществляется с шин 380 В и 220 В существующих подстанций по отдельному силовому кабелю.

В централизованных сетях, питающихся от мощных генераторов электрических станций, частота переменного тока поддерживается с большой точностью, примерно ±0,25...0,5%. Колебания напряжения на шинах оконечной трансформаторной подстанции (подстанция ТПЗ на рис. 17.1) обычно не превышает ±5% от номинального значения; изменения напряжения на зажимах вторичных источников питания радиоаппаратуры не должна при этом превышать 5...10%.

Для питания передвижных РТС используются автономные агрегаты с синхронными и индукторными генераторами однофазного и трехфазного переменного токов и напряжения 115, 230 и 380 В промышленной (50 Гц) и повышенной (400 Гц) частоты.

Мощности генераторов автономных агрегатов относительно невелики (от единиц до нескольких десятков киловатт). Автономные агрегаты питания применяют для питания передвижных комплексов, расположенных в местах, где отсутствуют стационарные электрические сети переменного тока. Автономные агрегаты питания автоматически поддерживают частоту и напряжение на выходе генератора с достаточно высокой точностью (порядка ±1 ... 2% по частоте и ±2...3% по напряжению). Это позволяет при соединительных линиях небольшой длины обеспечить колебания напряжения на зажимах вторичных источников питания порядка ±5%.

В зависимости от требований, предъявляемых радиотехническими схемами к вторичным источникам электропитания, объема радиоаппаратуры, ее конструктивного исполнения и потребляемой мощности, все системы вторичного электропитания могут быть разделены на индивидуальные и централизованные. Структурные схемы индивидуальных систем питания приведены на рис. 17.2.

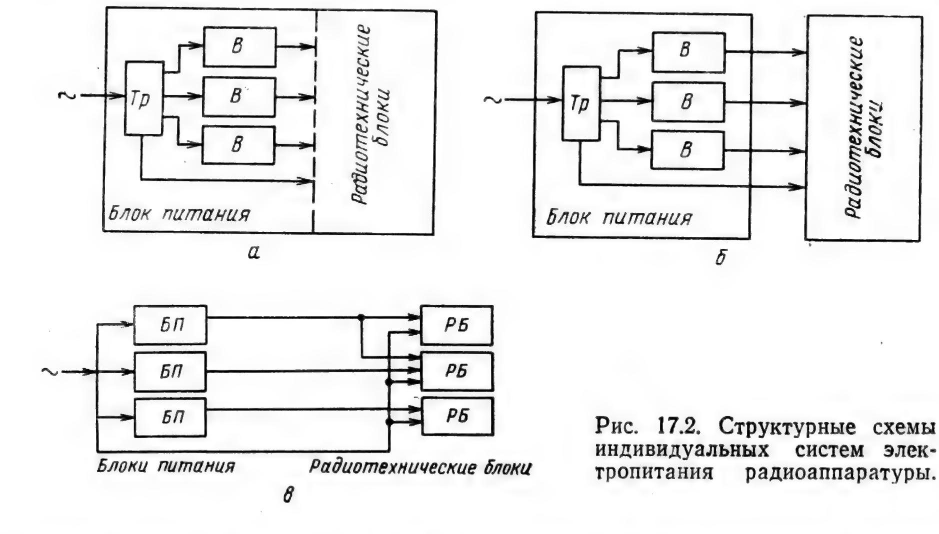


Рис. 17.2. Структурные схемы индивидуальных систем электропитания радиоаппаратуры.

В устройствах, потребляющих мощность до нескольких сотен ватт и представляющих собой единое конструктивное целое, элементы системы питания размещаются непосредственно в них (рис. 17.2,*а*).

В устройствах, потребляющих мощность до нескольких десятков киловатт, элементы системы питания часто выделяют в отдельные конструктивные элементы (блоки питания), на выходе которых имеются все необходимые напряжения постоянного и переменного токов (рис. 17.2,*б*).

В устройствах, потребляемая мощность которых может достигать нескольких сотен киловатт, блоки питания (БП) выполняются лишь на один номинал выходного напряжения (рис. 17.2,*в*).

Для питания мощных и сложных комплектов радиоаппаратуры, содержащих большие количества однотипных элементов и предъявляющих высокие требования к стабильности выходных напряжений источников питания, в последнее время начали применяться централизованные системы питания (рис. 17.3).

Схема, представленная на рис. 17.3,*а*, содержит групповые выпрямите-

ли ГВ (стабилизированные и нестабилизированные, в зависимости от предъявляемых к системе питания требований) на несколько питающих напряжений и систему распределительных шин, к которым непосредственно подключаются радиотехнические блоки устройства (РБ). Такая система экономичнее системы с индивидуальными блоками как по стоимости, так и по к. п. д.

Однако она требует прокладки распределительных сетей с малыми потерями напряжения и поэтому невыгодна при низких напряжениях. Недостатком этой схемы является также наличие непосредственной электрической связи между радиотехническими блоками по цепям питания, что в ряде случаев нежелательно. Представленная на рис. 17.3,*б* схема отличается от схемы 17.3,*а* тем, что радиотехнические блоки питаются от распределительных шин не непосредственно, а через стабилизирующие приставки СП (т. е. через стабилизаторы без индивидуальных выпрямителей). Эта схема обеспечивает хорошую развязку между радиотехническими блоками по цепям питания, в ней не требуются дорогие распределительные сети с малыми потерями, так как колебания напряжения в этих сетях практически не влияют на величины выходных напряжений стабилизирующих приставок. Недостатком схемы является ее более низкий к. п. д. по сравнению со схемой 17.3,*а*. Такая схема применяется для питания сложных комплексов радиоаппаратуры.

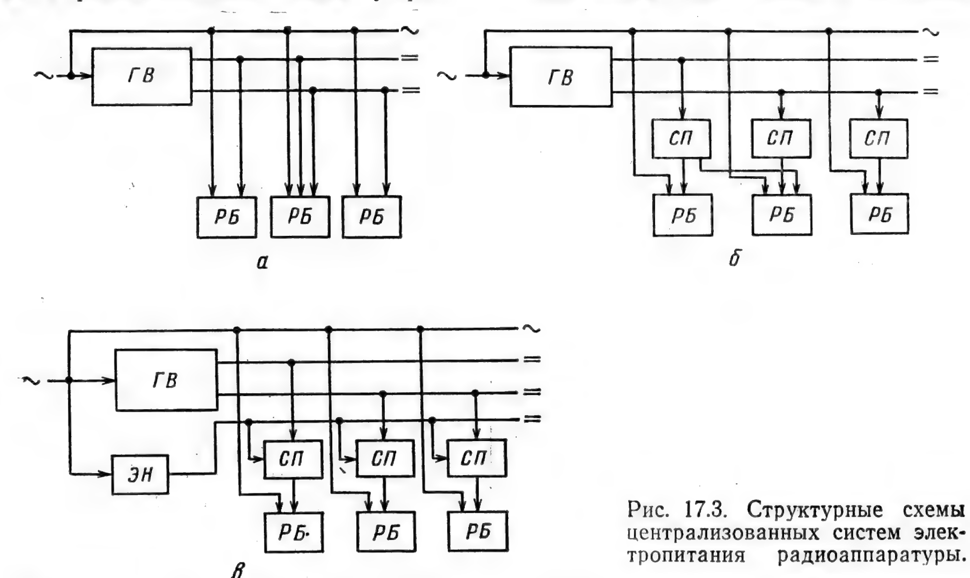


Рис. 17.3. Структурные схемы централизованных систем электропитания радиоаппаратуры.

В тех случаях, когда к системе питания предъявляются весьма высокие требования по стабильности выходных напряжений, используется схема, приведенная на рис. 17.3,*в*, отличающаяся тем, что она содержит один общий для всей системы источник эталонного напряжения (ЭН). В этой схеме уровни выходных напряжений стабилизирующих приставок изменяются в одинаковой степени, что значительно повышает точность работы РТС. Такие схемы применяются для питания сложных измерительных или формирующих комплексов радиоаппаратуры высокой точности.

17.2. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ РТК

РТК можно разделить на две большие группы: стационарные и передвижные. Примером стационарных комплексов служат передающие и приемные радиоцентры, телецентры, радиолокационные системы и др. Они характеризуются большой потребляемой мощностью и высокими требованиями к надежности систем электропитания.

Питание стационарных комплексов осуществляется от централизованных электрических сетей по схемам, приведенным на рис. 17.1—17.3. С целью повышения надежности электроснабжения для потребителей предусматривают питание их электроэнергией не менее чем по двум независимым линиям, одна из которых является рабочей, а вторая —

резервной. Ввод в действие резервной линии, как правило, осуществляется автоматически.

По характеру нагрузки и схемам электропитания стационарные РТС могут быть разделены на две группы — передающие и приемные устройства [4].

Первичное питание передатчиков осуществляется обычно от сети напряжением 380/220 В. Однако при достаточно больших мощностях передатчиков питание мощных высоковольтных выпрямителей производится непосредственно от сети 10 кВ. Исключение двойной трансформации напряжения (с 10 кВ на 380 В и с 380 В до значения, определяемого требуемой величиной выпрямленного напряжения) позволяет значительно сократить потери энергии и упростить электрическую схему. В качестве примера на рис. 17.4 приведена структурная схема питания стационарного радиопередающего устройства.

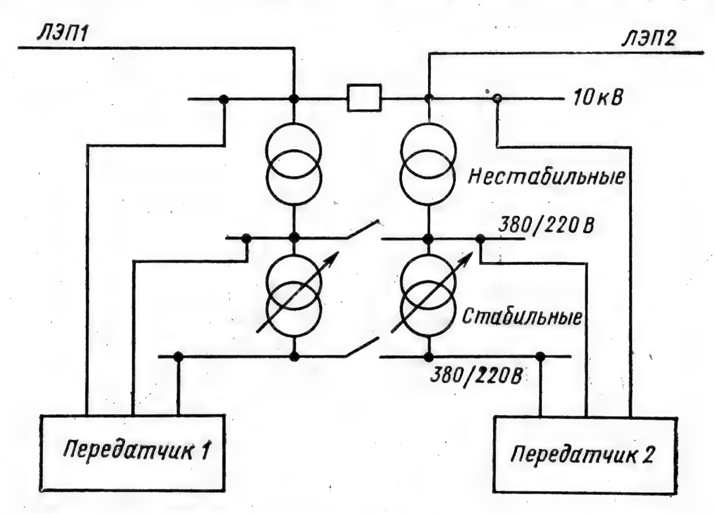


Рис. 17.4. Структурна схема электропитания стационарного радиопередающего устройства.

Приемные устройства стационарных РТС характеризуются значительно меньшей потребляемой мощностью по сравнению с передающими устройствами. Однако несмотря на это требования к надежности их электроснабжения остаются весьма высокими.

Как и в случае питания передающих устройств, питание ответственных приемных устройств обеспечивается не менее чем от двух независимых источников электрической энергии. Одним из источников является централизованная сеть переменного тока. В качестве второго источника в зависимости от требований надежности могут применяться: вторая линия от централизованной сети или резервная автономная электростанция.

Приемные устройства малой мощности питаются, как правило, напряжением с частотой 50 Гц. При относительно больших мощностях для сокращения габаритных размеров и веса вторичных источников питания применяется преобразование частоты 50 Гц в частоту 400 Гц с помощью электромашинных и статических преобразователей.

Питание аппаратуры радиоприемных устройств осуществляется по схемам индивидуального питания, приведенным в § 17.1 (чаще по схемам 17.2,*б* и *в*).

На рис. 17.5 в качестве примера представлена структурная схема питания стационарного радиоприемного устройства, состоящего из собственно приемной, индикаторной аппаратуры и вычислительных средств. Для питания аппаратуры передвижных РТС часто применяются генераторы, приводимые во вращение от двигателей, используемых для передвижения этих систем. Для обеспечения допустимых колебаний напряжения на зажимах генераторов, вызываемых изменением скорости вращения транспортных двигателей в процессе движения, применяют специальные устройства стабилизации скорости вращения и автоматические регуляторы напряжения. Этот вид обеспечения электрической энергии нашел наибольшее распространение в авиационных установках. При этом используются как ге-

нераторы постоянного, так и переменного тока повышенной частоты.

В ряде случаев для вращения генераторов используются автономные двигатели. Питание аппаратуры передвижных РТС осуществляется обычно по схемам индивидуального питания, приведенным в § 17.1.

На рис. 17.6 в качестве примера представлена одна из возможных структурных схем питания судовых РТС.

В авиационных установках при наличии бортовой сети постоянного тока весьма экономичной и широко используемой является схема, приведенная на рис. 17.7. Она содержит статические преобразователи постоянного и переменного напряжения, обеспечивающие питание радиоаппаратуры, не требующей высокой стабильности питающих напряжений. Для получения стабильных напряжений используются ключевые стабилизаторы напряжения как наиболее экономичные [4, 7].

Радиоаппаратура, размещаемая на искусственных спутниках Земли и кос-

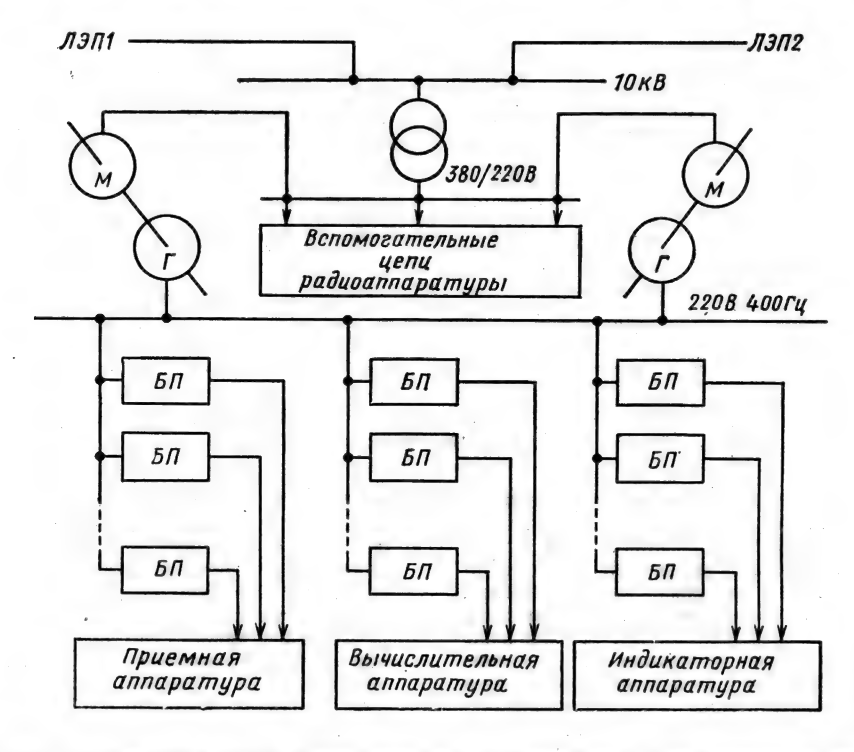


Рис. 17.5. Структурная схема электропитания стационарного радиоприемного устройства.

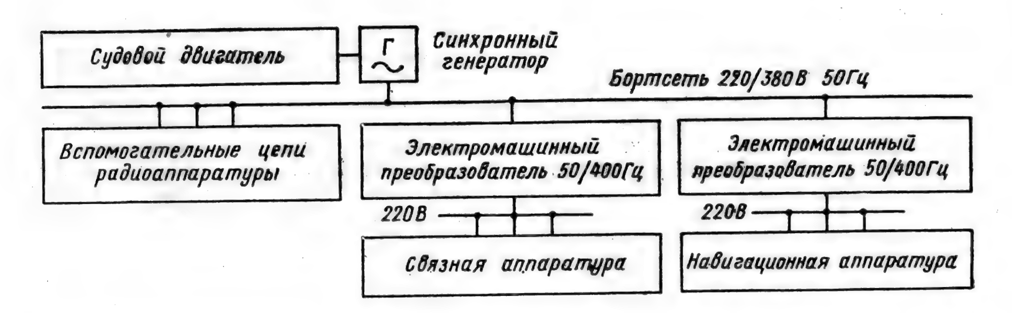


Рис. 17.6. Структурная схема электропитания судовой радиотехнической системы.

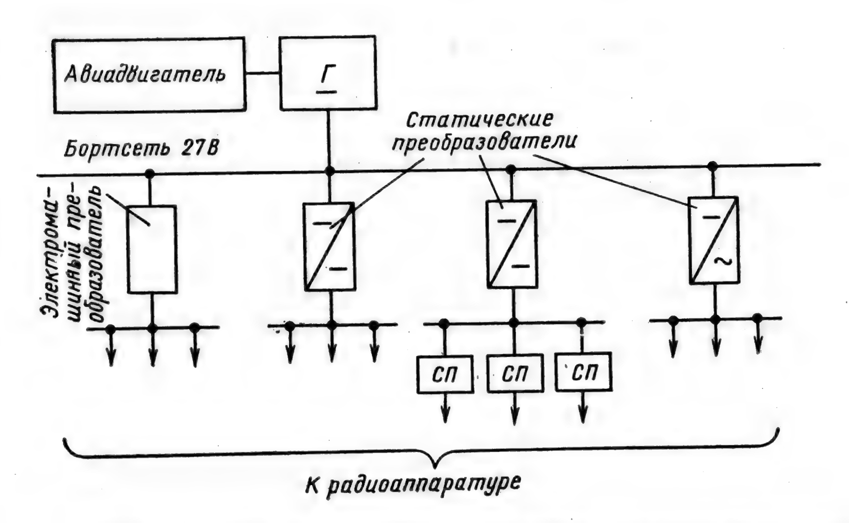


Рис. 17.7. Структурная схема электропитания авиационной радиотехнической системы.

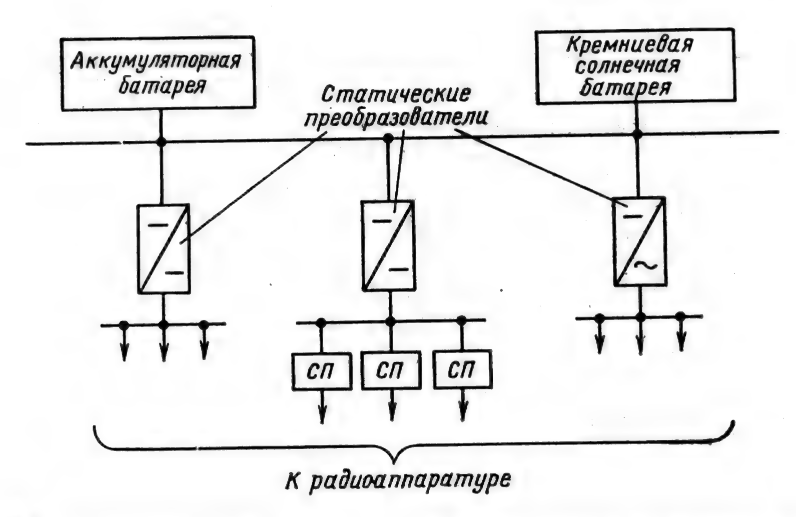


Рис. 17.8. Структурная схема электропитания радиоустановок космических кораблей.

мических кораблях, характеризуется относительно малой потребляемой мощностью [4]. Основным источником электрической энергии для космических кораблей в условиях ближнего космоса при мощностях до тысячи ватт являются серебряно-цинковые аккумуляторы, работающие в буферном режиме с включенной параллельно им кремниевой солнечной батареей. При полете корабля в освещенной Солнцем зоне радиоаппаратура питается от кремниевых солнечных батарей, которые одновременно подзаряжают аккумуляторы. При полете же в зоне земной тени питание обеспечивается одной лишь батареей. Структурная схема такой системы приведена на рис. 17.8 [4, 7].

При необходимости длительного пребывания в области земной тени и в особенности при полетах в дальнем космосе более перспективным становится использование (вместо аккумуляторов и кремниевых солнечных батарей) термоэлектрических преобразователей со встроенными ядерными источниками тепла. Такая схема делает источники электрической энергии совершенно автономными и способными работать в любых условиях. В остальном структурная схема электропитания аналогична приведенной на рис. 17.8.

17.3. ПРОВЕРКА НЕСТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Выпрямители классифицируются по величине выпрямленного напряжения, стабильности выпрямленного напряжения, типу выпрямителя, величине тока нагрузки, принципиальной схеме выпрямителя, конструктивной компоновке [17, 24].

По величине выпрямленного напряжения различают низковольтные и высоковольтные выпрямители. По стабильности выпрямленного напряжения их можно разделить на нестабилизированные и стабилизированные. Последние подразделяют на параметрические стабилизаторы выпрямленного напряжения и электронные стабилизаторы напряжения компенсационного типа. По конструктивной компоновке можно различать выпрямители в виде самостоятельного прибора и встроенного блока питания.

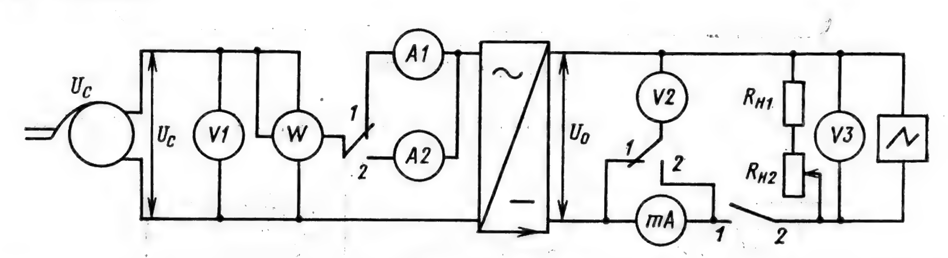


Рис. 17.9. Структурная схема проверки параметров маломощного нестабилизированного выпрямителя.

Основными параметрами выпрямителей являются: величина выпрямленного напряжения, ток нагрузки, коэффициенты стабилизации и пульсации, напряжение и ток холостого хода, допустимые колебания выходного напряжения, симметрия вторичной обмотки (для двухполупериодного выпрямителя), к. п. д. и др.

Наиболее широкое распространение получило питание различных радиоустройств от электронных выпрямителей.

Большая часть выпрямителей не требует настройки. В таких выпрямителях проверяют соответствие вышеупомянутых параметров (или части этих параметров) техническим условиям. Настройке подлежат лишь выпрямители с электронной стабилизацией и некоторые типы высоковольтных выпрямителей.

В нестабилизированных выпрямителях проверяется соответствие параметров требованиям технических условий. Проверяют также правильность номиналов предохранителей, а в ряде случаев сопротивление изоляции отдельных участков монтажа. Для проверки электрических параметров нестабилизированных выпрямителей собирается соответствующая схема (рис. 17.9).

С помощью автотрансформатора устанавливается заданная величина переменного напряжения на входе выпрямителя. Наличие автотрансформатора позволяет производить проверку выпрямителя при изменении электрических условий эксплуатации (при номинальном, повышенном и пониженном напряжениях на входе).

Иногда для устранения нестабильности сетевого (переменного) напряжения в схему измерений до автотрансформатора включается феррорезонансный стабилизатор напряжения. Однако наличие стабилизато-

ра приводит к значительному искажению формы напряжения пульсаций на его выходе за счет роста амплитуд гармоник.

Измерение ряда параметров осуществляется вольтметрами и амперметрами переменного и постоянного токов требуемого класса точности, рассчитанных на заданные пределы измерений и включаемых соответственно на вход и выход выпрямителя. Для измерения постоянной составляющей выпрямленного напряжения применяются вольтметры магнитоэлектрической системы класса точности не ниже 1,5 и электронные вольтметры. Использование вольтметров электростатической системы возможно только при малых напряжениях пульсаций. При больших пульсациях перед вольтметром включается сглаживающий фильтр, в противном случае будет получено увеличенное значение напряжения. При измерениях используются такие шкалы, чтобы отсчет производился в их второй половине. При этом не следует забывать, что шкалы приборов градуируются в эффективных значениях напряжения.

На выходе выпрямителя включается сопротивление нагрузки, на которую он рассчитан. Иногда сопротивление нагрузки выполняется из переменного и постоянного резисторов. Переменный резистор (проволочный) обеспечивает изменение сопротивления нагрузки в заданных пределах, в постоянный резистор исключает возможность случайного короткого замыкания.

После установки с помощью автотрансформатора номинальной величины питающего напряжения и требуемого значения номинального тока нагрузки изменением величины сопротивления нагрузки производится проверка параметров выпрямителей и соответствие измеренных параметров техническим требованиям.

Когда выпрямленное напряжение не соответствует величине, оговоренной в технических условиях; необходимо проверить выпрямительный элемент, сопротивление дросселя фильтра, а также емкость конденсаторов фильтра. Если эти элементы оказываются исправными, то следует проверить напряжения во вторичной обмотке трансформатора и в обмотке накала кенотрона.

Проверка пульсаций выпрямленного напряжения может производиться приборами переменного тока, внутреннее (входное) сопротивление $R_{\text{пер}}$ которых должно быть значительно больше сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$ и выходного конденсатора фильтра $X=1/\omega C_{\text{ф}}$, где ω — круговая частота пульсации, т. е.

$$R_{\text{н}}<R_{\text{пер}}>1/\omega C_{\text{ф}}.$$

К таким приборам относятся электронные вольтметры и осциллографы. Измерения производятся при номинальном режиме работы выпрямителя, поскольку при нарушении режима изменяются напряжения пульсации. Величина напряжения пульсаций также зависит от изменения тока нагрузки, так как при этом меняется величина постоянного подмагничивания, а следовательно, и индуктивность дросселя фильтра.

Выбор приборов для измерения напряжения пульсаций необходимо производить из условий обеспечения заданной точности измерений и непревышения величиной выпрямленного напряжения допустимых пределов измерений электронного вольтметра или осциллографа по постоянному напряжению.

В случае превышения указанных пределов в схему проверки включается разделительный конденсатор или делитель напряжения.

Схемы подключения приборов для измерений напряжений пульсаций представлены на рис. 17.10.

Емкость включенного в схему (рис. 17.10,*а*) измерений разделительного конденсатора $C_р$ необходимо выбирать из условия, чтобы его сопротивление на частоте пульсаций было весьма малым. Входные цепи измерительных приборов чаще всего представляют собой реостатно-

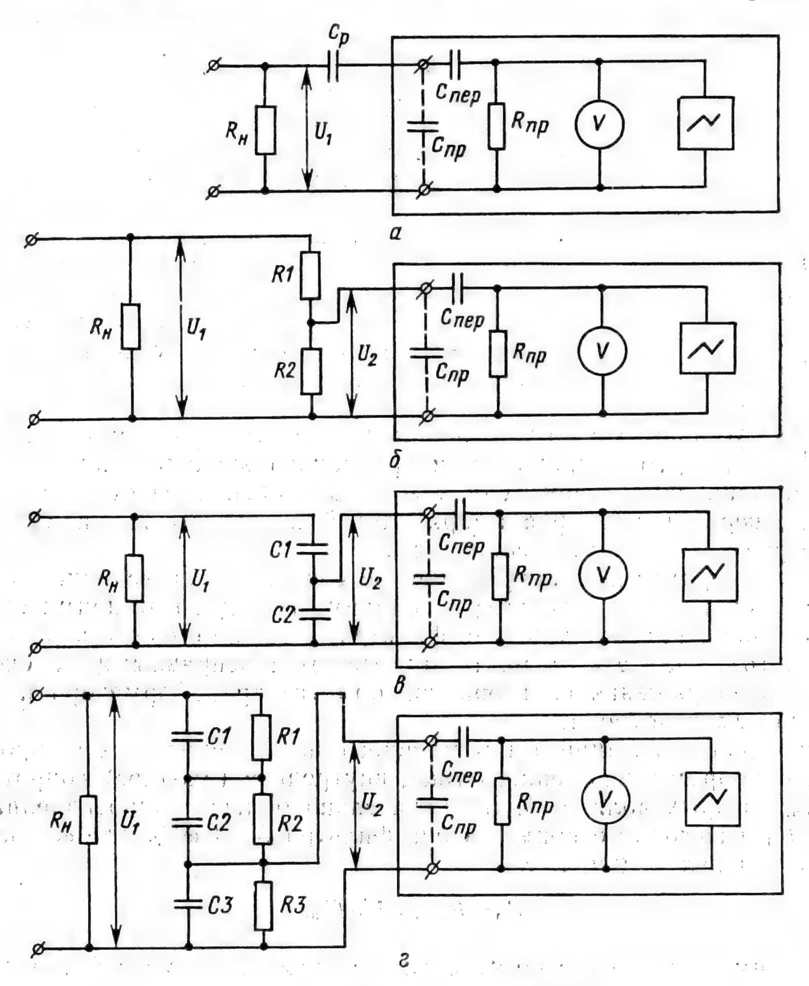


Рис. 17.10. Схемы подключения приборов для измерений напряжений пульсаций.

емкостные делители, которые совместно с разделительным конденсатором образуют схему, приведенную на рис. 17.10,*а*, что следует учитывать при определении величины напряжения пульсаций.

Делители напряжения могут быть составлены из активных сопротивлений и емкостей. Составляя делитель из чисто активных сопротивлений (рис. 17.10,*б*), необходимо, с одной стороны, выбирать величину полного входного сопротивления делителя так, чтобы его подключение не нарушало режима работы проверяемого выпрямителя ($R1+R2\gg\gg R_н$), а с другой — чтобы сопротивление элемента делителя $R2$ было много меньше $R_{пер}$. При этом следует учитывать, что включение актив-

ного делителя приводит к бесполезному увеличению потребляемой выпрямителем энергии.

При использовании активного делителя [24]

$$U_1 = U_2(1/K + R1/R_{пер}),$$

где $K = R2/(R1+R2)$.

При проверках необходимо учитывать, в каких значениях синусоидального напряжения проградуирована шкала прибора.

В условиях эксплуатации наиболее часто применяются емкостные делители, выпускаемые промышленностью (рис. 17.10,*в*). Для исключения фильтрующего действия конденсаторов *C1* и *C2* их емкости выбирают не менее чем в 10 раз меньше емкости конденсаторов фильтра выпрямителя. При определении коэффициента деления необходимо учитывать влияние емкости переходного конденсатора $C_{пер}$ на входе измерительного прибора.

С целью повышения безопасности измерений напряжений пульсаций высоковольтных выпрямителей и уменьшения величин постоянных напряжений на конденсаторах делителя применяются реостатно-емкостные делители напряжения (рис. 17.10,*г*), позволяющие использовать конденсаторы с меньшим допустимым рабочим напряжением.

Измерение напряжений пульсаций осциллографом обеспечивает бо́льшую точность, чем электронным вольтметром, так как позволяет одновременно проверить форму напряжения. Перед проведением измерений осциллограф калибруется. Калибровка может осуществляться следующими способами:

— приведением чувствительности осциллографа к предусмотренным для него нормам;

— сравнением величин отклонения луча в электронно-лучевой трубке, вызванным образцовым и измеряемым напряжениями;

— предварительной калибровкой чувствительности при подаче напряжения от эталонного источника.

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения (отношение напряжения пульсаций, — переменной составляющей напряжения на выходе фильтра выпрямителя, к величине выпрямленного напряжения) определяется по формуле

$$K_{плс} = 100\,\% \, (U_{пер}/U_{выпр}),$$

где $K_{плс}$ — коэффициент пульсаций, %; $U_{пер}$ — переменная составляющая напряжения на выходе фильтра выпрямителя, определяемая в вольтах эффективного значения; $U_{выпр}$ — величина выпрямленного напряжения на выходе фильтра выпрямителя.

Когда напряжение и коэффициент пульсаций выше допустимых, необходимо проверить по осциллографу частоту пульсаций. Если она равна частоте питающего напряжения, то при двухполупериодной схеме выпрямления следует сменить трансформатор, а при однополупериодной — проверить исправность и параметры фильтра. При удвоенной частоте пульсаций следует проверить исправность фильтра.

Измерение тока холостого хода производится при отключении всех нагрузок выпрямителя, в том числе и накальных цепей, и при вынутых лампах самого блока питания. Чрезмерно большой ток холостого хода свидетельствует о неплотной сборке пакета трансформатора, плохой изоляции листов железа и стягивающих пакет шпилек, а также о наличии короткозамкнутых витков в любой обмотке трансформатора.

Иногда представляет интерес определение симметрии вторичной обмотки трансформатора с выводом от средней точки. Эту симметрию можно вычислить по формуле

$$\Delta a_{\delta} = 200\% [(2U'_{II} - U_{II})/U_{II}],$$

где Δa_{δ} — асимметрия, %; U'_{II} — напряжение на любой из половин вторичной обмотки; U_{II} — напряжение на всей вторичной обмотке.

В ряде случаев по измеренным параметрам подсчитывают к. п. д. выпрямителя $\eta_{в}$, определяемый как отношение полезной мощности, потребляемой от выпрямителя $P_{0\,ном}$, к мощности, подводимой к нему от сети переменного тока $P_{с\,ном}$

$$\eta_{в} = 100\% \, (P_{0\,ном}/P_{с\,ном}).$$

Снятие внешней характеристики выпрямителя $U_0 = f(I_0)$ производится путем измерения выпрямленного напряжения U_0 и потребляемого тока I_0 при изменении сопротивления нагрузки выпрямителя в допустимых пределах и неизменном напряжении сети.

Если в блоке питания предусмотрена возможность регулировки выпрямленного напряжения, то производится проверка плавности регулировки и пределов регулирования путем измерения напряжений при установке органов регулирования в крайние положения и неизменном значении тока нагрузки. При этом должен обеспечиваться требуемый запас регулировки (величина изменения выходного напряжения при вращении регулятора от положения, соответствующего заданному пределу регулирования, до упора).

Когда имеются предохранительные и сигнализирующие устройства, обеспечивающие отключение питающего напряжения при коротком замыкании на выходе блока и сигнализацию о перегорании предохранителя, проверка таких устройств производится при несколько заниженном напряжении сети путем короткого замыкания сопротивления нагрузки, что должно приводить к перегоранию предохранителя и загоранию сигнальной лампы.

Проверка высоковольтных выпрямителей заключается в определении соответствия выпрямленного напряжения техническим условиям при номинальной нагрузке на выходе. Основной специфической особенностью проверки таких выпрямителей является измерение в цепях с высоким напряжением. При этом пользуются вольтметрами статической системы, не создающими нагрузки на проверяемой цепи.

Одной из основных особенностей проверки высоковольтных выпрямителей является необходимость строгого соблюдения правил и мер безопасности. Перед проверкой следует хорошо изучить схему и принцип ее работы, знать последовательность включения приборов и проведения контрольных операций. Все измерительные приборы необходимо тщательно заземлять.

Особенностью проверки высоковольтных источников питания мощной передающей аппаратуры является необходимость тщательного контроля и наладки систем управления, блокировки и сигнализации.

17.4. ПРОВЕРКА И НАСТРОЙКА СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Параметрические стабилизаторы выпрямленного напряжения, основанные на использовании одного или нескольких нелинейных элементов (например, стабилитронов), практически не настраиваются. Настройке

подлежат электронные стабилизаторы напряжения компенсационного типа, которые подразделяются на две основные группы: с последовательным или параллельным регулирующим элементом (электронной лампой или транзистором). Целью настройки является достижение номинального выпрямленного напряжения при заданном коэффициенте стабилизации. Настройка производится потенциометром регулирующего элемента.

Коэффициентами стабилизации, учитывающими зависимость выходного напряжения стабилизатора $U_{вых}$ от входного напряжения $U_{вх}$, тока нагрузки $I_н$ и частоты сети f, оценивается качество работы стабилизатора. Эти коэффициенты показывают, во сколько раз относительное изменение выходного напряжения меньше, чем относительное изменение одного из влияющих на него факторов. Различают следующие коэффициенты стабилизации:

— по напряжению

$$(K_{стб})_U = \Delta U_{вх} U_{вых\,ном} / U_{вх\,ном} \Delta U_{вых};$$

— по току

$$(K_{стб})_I = \Delta I_н U_{вых\,ном} / I_{н\,ном} \Delta U_{вых};$$

— по частоте

$$(K_{стб})_f = \Delta f U_{вых\,ном} / f \Delta U_{вых}.$$

Степень стабильности выходного напряжения зависит также от внешних условий, таких, как температура, влажность и т. д.

Важным параметром стабилизатора является допустимый диапазон изменения указанных факторов, в пределах которого обеспечивается требуемая точность стабилизации.

Стабильность рассматриваемых источников питания характеризуется также относительной нестабильностью выходного напряжения $|\Delta U_{вых}| / U_{вых\,ном} \cdot 100\%$, вызванной суммарным действием всех нестабилизирующих факторов. Относительная нестабильность источников питания современных радиоэлектронных устройств характеризуется следующими допустимыми пределами изменения выходного напряжения: малая стабильность $\pm(2\ldots5)\%$; средняя стабильность $\pm(0{,}5\ldots2)\%$; высокая стабильность $\pm(0{,}001\ldots0{,}5)\%$.

Из рассмотрения параметров работы стабилизатора следует, что главным при определении коэффициентов стабилизации является измерение очень малого изменения выходного напряжения (доли вольта) при сравнительно большом абсолютном значении выпрямленного напряжения.

Для оценки относительных изменений выходных напряжений стабилизированных выпрямителей находят применение как измерители нестабильности напряжений (типов В2-13, В8-1; В8-3 и др.), выпускаемые промышленностью, так и специальные схемы измерений.

Особенностью приборов является их способность измерять очень малые величины постоянного напряжения при наличии общего высокого уровня постоянной составляющей, на несколько порядков превышающего измеряемую величину. Измерители нестабильности позволяют исследовать диапазон напряжений примерно от —500 В до +5000 В. Для измерения параметров стабилизированных выпрямителей с помощью специальных измерительных схем используется компенсационный метод. Метод заключается в том, что измеряемое напряжение сравнивается с эталонным постоянным напряжением.

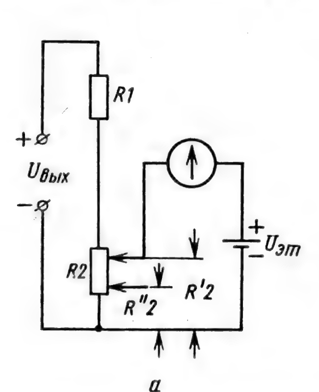
При средней стабильности для определения изменения выпрямленного напряжения используется схема, приведенная на рис. 17.11,*а*. Изменением величины сопротивления резистора *R2* добиваются равенства напряжений на резисторе *R2* и нормального элемента, при котором стрелка гальванометра устанавливается на нуль шкалы. При этом напряжение нормального элемента $U_{эт}$ компенсируется напряжением на резисторе *R2* созданным током

$$I_1 = U_{вых}/(R1+R2) = U_{эт}/R_2.$$

После воздействия какого-либо фактора, приводящего к изменению напряжения $U_{вых}$, изменением величины резистора *R2* вновь добиваются установки стрелки гальванометра на нуль шкалы. Считая ток I_1 неизменным и зная разность сопротивлений $\Delta R = R'_2 - R''_2$ предыдущего замера, можно определить изменение выпрямленного напряжения

$$\Delta U_{вых} = I_1 \Delta R = U_{эт} \Delta R / R_2.$$

При необходимости определения высокой стабильности маломощных выпрямителей измерения производится с помощью высокоомного потенциометра постоянного тока (ППТВ-1 или ему подобного), обеспечивающего измерения с точностью до 0,00001 В. Так как верхний предел измерения напряжения потенциометра очень мал (1 ... 2 М), то в схему



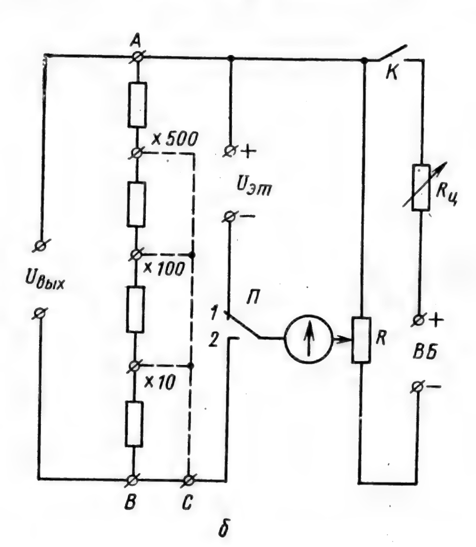


Рис. 17.11. Схемы определения величины нестабильности выходного напряжения компенсационным методом.

измерений включается делитель напряжения ДН-1, увеличивающий этот предел до 600 В (рис. 17.11,*б*). Чтобы исключить быстрый выход из строя нормального элемента, входящего в схему прибора (ППТВ-1), и обеспечить постоянство величины тока в цепи потенциометра, в схему включается вспомогательная батарея (ВБ) с напряжением (1,3 ... 2,2) В.

В усилительных каскадах схем электронных стабилизаторов может возникать паразитная обратная связь, приводящая к самовозбуждению, что является причиной появления на выходе стабилизатора колебаний с частотой, отличной от частоты пульсаций. Напряжение

паразитной генерации обнаруживается при просмотре формы выходного напряжения на экране осциллографа.

Измерение других параметров стабилизированных выпрямителей, производится так же, как это рекомендуется и для нестабилизированных. Следует лишь учитывать, что при измерении коэффициента пульсаций, который в стабилизированных схемах весьма мал, вольтметры должны иметь шкалы 0,5 В и меньше.

Широкое применение получили преобразователи на полупроводниковых приборах. При этом созданы как преобразователи переменного напряжения в постоянное, так и постоянного тока в переменный [24]. Проверка и настройка таких преобразователей имеет некоторые особенности.

Перед настройкой преобразователя необходимо проверить правильность подсоединения полюсов источников первичного питания, в противном случае могут выйти из строя транзисторы. Обычно в мощных преобразователях предусматривается схема защиты от неправильного подключения источника первичного питания.

Включение первичного источника питания в преобразователь производится при подключенном сопротивлении нагрузки, так как при холостом ходе может произойти пробой диодов. Мощные преобразователи, рассчитанные на питание от источника напряжения 12 В и более, следует вначале включить при пониженном на 20 ... 30% напряжении питания.

Наличие колебаний и форму генерируемых импульсов проверяют с помощью электронного осциллографа.

При проверке преобразователя производится оценка устойчивости запуска преобразователя, измерение выходного напряжения при номинальной нагрузке и при перегрузке на 10 ... 15%, а также при пониженном напряжении источника питания. Иногда при проверке интересуются устойчивостью запуска, величиной и формой напряжения при изменении температуры.

Особое значение для мощных преобразователей имеет проверка температурного режима транзисторов, эффективности охлаждения радиаторов. С этой целью, как правило, проверяют перегрев транзисторов, качество контакта корпуса транзисторов с теплоотводящим радиатором. Проверка и настройка выпрямительной части преобразователя производится по методике, изложенной выше.

Глава 18

ПОДГОТОВКА РТК К ПРИМЕНЕНИЮ

В широком смысле подготовка РТК к применению включает:

— период ввода в эксплуатацию;

— проверки основных параметров и характеристик при работе по реальным объектам;

— проверку отдельных устройств системы и комплекса в целом различными методами;

— учет электромагнитной совместимости при планировании работ.

В настоящей главе для примера перечисленные вопросы рассматриваются применительно к системам измерения координат и параметров движения объектов в пространстве [5, 18, 30, 36].

Для подвижной РТС монтаж оборудования в автомашинах, прицепах, фургонах и т. д. производится на заводе-изготовителе. Период ввода в эксплуатацию такой системы заключается в выборе площадки, размещении на ней фургонов с аппаратурой, геодезической привязке и проверке работоспособности.

Для стационарного комплекса, когда аппаратура установлена в специальных технических зданиях, период ввода можно разделить на следующие этапы [42, 49]:

— подготовка аппаратуры к монтажу и ее монтаж;
— наладка, монтажные испытания и пуск (опробирование);
— регулирование;
— комплексное опробирование;
— сдача в эксплуатацию.

Периоду ввода предшествует строительство технических зданий и сооружений для размещения радиотехнической аппаратуры.

К площадке, на которой будет размещен РТК, предъявляется целый ряд требований: соответствие размеров составу комплекса, диапазону рабочих частот, типам и размерам антенн; отсутствие в рабочей зоне соответствующих систем сооружений (труб, зданий, высоковольтных мачт и пр.), отражения от которых мешали бы приему и распознаванию сигнала или маскировали бы его; отсутствие вблизи комплекса источников радиопомех. Выбор площадки производится с учетом близости энергосетей, телеграфных и телефонных линий связи, наличия и возможности построения путей сообщения с шоссейными магистралями и т. д.

Размещение различных элементов комплекса на площадке производится с учетом электромагнитной совместимости [12, 16]. При этом излучение при работе различных систем не должно попадать в окна жилых помещений.

Строительство технических зданий и сооружений производится в соответствии со строительными нормами и правилами (СН и П) по типовым или индивидуальным проектам [38]. При выполнении строительных работ должны соблюдаться правила техники безопасности, нормы промышленной санитарии, мероприятия по борьбе с производственными шумами и правила противопожарной охраны, изложенные в действующих нормативных документах [39]. В ходе строительства представителем заказчика осуществляется контроль. При этом особое внимание обращается на высококачественное выполнение так называемых скрытых работ (конструктивные элементы зданий, подземные коммуникации, экранировка отдельных помещений, подземная часть защитных заземлений и т. д.). Скрытые работы подлежат приемке представителем заказчика до их закрытия с составлением актов на скрытые работы. Эти промежуточные акты предъявляются рабочей комиссии при приемке объекта в эксплуатацию [39].

Перед окончанием строительства начинают подготовительные работы к монтажу аппаратуры. Основное содержание этих работ заключается в своевременной поставке оборудования и подготовке помещений для монтажа. Порядок транспортирования аппаратуры от места получения до места монтажа, правила распаковки, осмотра, расконсервации и проведения ревизии оговариваются в «Инструкции по монтажу, пуску, регулированию и обкатке изделия на месте его примене-

ния» (ИМ). Содержание этой инструкции было рассмотрено в гл. 10.

При организации временного хранения радиотехнической аппаратуры перед ее монтажом следует помнить, что хранить оборудование на открытом воздухе без навеса не разрешается. Допускается оставлять аппаратуру без навеса сроком до одних суток, но обязательно укрытой брезентом [39].

Монтаж аппаратуры производится в соответствии с планом ее размещения и установки в техническом здании или сооружении, с соблюдением требований эксплуатационно-технической документации, правил монтажа электротехнических установок и санитарных норм на размещение радиотехнического оборудования.

Размещение оборудования в аппаратных выполняется с соблюдением следующих условий [25]:

— удобство и безопасность его обслуживания;

— свободный доступ для осмотра и ремонта оборудования, открытия дверей, снятия кожухов и блоков аппаратуры;

— минимальная длина антенного ввода и проводов питания;

— отдаленность от отопительных приборов на определенное расстояние;

— освещения рабочего места с левой стороны.

На окнах аппаратных предусматриваются теневые шторы для защиты аппаратуры от солнечных лучей [25, 42].

Крупногабаритное оборудование подается в техническое здание к месту установки через оконные или специально предусмотренные монтажные проемы [40].

Технологическая последовательность монтажа составных частей РТС, а также перечень операций, подлежащих обязательному контролю при приемке работ, изложена в ИМ данной системы. В этой же инструкции указываются необходимые наладочные работы и виды частных испытаний, предшествующие опробованию [49]. Подготовка смонтированного оборудования к опробованию и включению проводится под руководством специально выделенного лица, несущего ответственность за безопасность выполнения этих работ [25, 31].

При первом включении оборудования в сеть высокого напряжения необходимо присутствие представителей строительно-монтажных и эксплуатирующей организаций [25].

Все работы по опробованию и включению оборудования, его наладка и испытания производятся в соответствии с «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей», «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» и главной СН и П «Электротехнические устройства. Правила организации и производства работ. Приемка в эксплуатацию».

При проведении регулировочных и настроечных работ отдельных блоков, устройств и системы в целом добиваются строгого соответствия всех параметров и характеристик нормам, установленным эксплуатационно-технической документацией [49].

После окончания индивидуального опробования, испытаний и регулирования смонтированного оборудования, производимых монтажными организациями, радиотехническая аппаратура принимается комиссией для комплексного опробования по акту. В состав рабочих комиссий входят представители заказчика (застройщика): представитель комиссии, генеральный подрядчик, субподрядчики и другие организации. Рабочие комиссии назначаются приказом руководителя предприятия или

вышестоящей организацией. С момента подписания указанного акта оборудование считается принятым заказчиком и он несет ответственность за его сохранность [38].

Комиссия определяет соответствие выполненных работ проекту и утвержденным нормам, качество выполненных работ и производит необходимые контрольные измерения, позволяющие определить соответствие основных технических характеристик значениям, оговоренным в эксплуатационно-технической документации [31].

Помимо проведения контрольных измерений, комиссия производит испытание всей аппаратуры в длительной работе во время опытного прогона, в процессе которого оборудование должно работать во всех режимах при номинальных значениях технических характеристик [31, 38].

Если проверяемая система входит в РТК, то проверяется стыковка с взаимодействующими средствами. При этом на каждом взаимодействующем средстве проверяется амплитуда, частота и форма входных и выходных сигналов, с последующей оценкой правильности функционирования связей в динамике.

Все замеченные комиссией недостатки устраняются строительно-монтажными организациями в установленные сроки. После устранения недостатков комиссия осуществляет повторную проверку, после чего объект может быть принят в постоянную эксплуатацию [38].

До сдачи РТС в постоянную эксплуатацию осуществляется комплектование обслуживающего персонала, который должен в процессе ввода системы в эксплуатацию в совершенстве освоить техническое обслуживание, основные настройки и регулировки аппаратуры, ее подготовку к применению и т. д., а также сдать экзамен по знанию должностных обязанностей, правил технической эксплуатации и правил техники безопасности [31].

18.2. ПРОВЕРКА ПАРАМЕТРОВ РТС ПРИ РАБОТЕ С РЕАЛЬНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Наиболее объективным методом оценки РТС после ввода в эксплуатацию является проверка ее работы с реальными объектами. Для этой цели используются облеты. В проведении облетов обычно используют нескоростной тип самолета, оборудованный соответствующей бортовой аппаратурой. Основными задачами облета являются [47]:

— проверка правильности функционирования как отдельных устройств, так и системы (комплекса) в целом;

— проверка правильности работы синхронных связей и согласование линий синхронных передач, функциональных и служебных каналов при совместной работе взаимодействующих средств;

— проверка надежности захвата и удержания цели;

— определение несоосности электрической и оптической осей антенны;

— определение систематических, случайных и динамических ошибок автосопровождения системы по угловым координатам;

— тренировка обслуживающего персонала в приобретении навыков работы по поиску и сопровождению движущихся объектов.

Проверка работы испытываемой системы может осуществляться путем сравнения всех ее выходных данных с данными системы, имеющей более высокие точностные характеристики, или с данными нескольких аналогичных систем после их математической обработки.

В процессе облета систем широко используются также оптические средства, фотокамеры, кинотеодолиты.

Курсы барражирования (рис. 18.1) выбираются таким образом, чтобы при соответствующих тактико-технических характеристиках самолета обеспечивалось его перемещение относительно поверяемой системы с требуемыми углами и угловыми скоростями.

При подготовке к самолетному облету на проверяемой системе и взаимодействующих средствах проводится необходимое техническое обслуживание, в полном объеме осуществляется автономная и комплексная проверки. Проверяется стыковка линий служебных связей, синхронных передач и информационных каналов со взаимодействующими средствами. Проводятся контрольные записи дальности и угловых координат, вводятся поправки на аппаратурные задержки, замеряется опорная частота синхронизации.

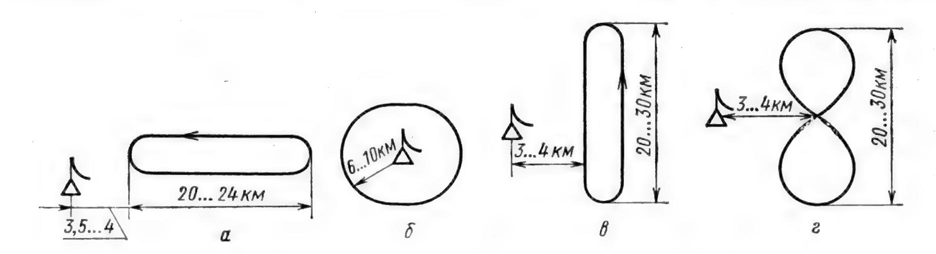


Рис. 18.1. Маршруты полета самолета при облете РТК.

Облет начинается с проверки правильности синхронных связей. Для этого РТС в автоматическом режиме осуществляет сопровождение летательного аппарата по угловым координатам. С помощью оптических средств осуществляется отслеживание целеуказаний. В случае больших рывков или отставаний антенн производят подстройку синхронных передач: подбирают усиление, обратную связь, демпфирование и т. д., после чего повторно проверяют качество отслеживания. После окончания подстройки синхронных передач на поверяемой системе и на всех средствах отслеживания целеуказаний производят регистрацию угловых координат. По результатам регистрации производится окончательная оценка качества работы синхронных передач в динамическом режиме. Точностные характеристики РТС могут быть определены по данным оптических измерений.

Для проверки надежности захвата и удержания цели используется программа полета самолета типа «челнок» (рис. 18.1,*а*). При этом большая сторона «челнока» может составлять 20 ... 24 км, а малая — минимально возможная. Высота полета переменная от 0,4 до 0,7 км. Антенна РТС наводится на самолет и включается в режим автоматического сопровождения. Рассматривая систему управления антенной вначале в одну, а затем в другую сторону, определяют моменты возникновения периодических колебаний антенны по азимуту и углу места. Оба крайние положения определяются и фиксируются по нескольким пробам, после чего элемент управления антенной устанавливается в среднее положение между фиксированными отметками.

Затем проверяют режим «втягивания» антенны по самолету, летящему курсом на РТС. Для этого в режиме ручного сопровождения

отводят антенну по азимуту (углу места) на 1 .. 1,5°, что определяется шириной диаграммы направленности вправо или влево (вверх или вниз), а затем переходят в режим автосопровождения. Антенна должна надежно «захватывать» цель.

Программа облета по кругу с радиусом порядка 6 ... 10 км и высотой полета 3 ... 4 км (рис. 18.1,*б*) используется для определения несоосности электрической оси антенны и оптической оси визира. За несоосность принимается отклонение центра сопровождаемого объекта от центра перекрестия оптического визира. Методика юстировки электрической оси антенны более подробно рассматривается в § 18.3.

Для определения величины и характера динамической ошибки сопровождения используется программа полета типа «челнок» (рис. 18.1,*в*) или «восьмерка» (рис. 18.1,*г*). Высота полета при этом может быть 3 ... 5 км. Проверка заключается в визуальном наблюдении в визир за положением самолета относительно центра перекрестия. Максимальные отклонения не должны превосходить величин, указанных в технических условиях и должны сохраняться при изменении направления полета самолета по азимуту и углу места.

18.3. ЮСТИРОВКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОСИ АНТЕНН

Измерению характеристик антенн обычно предшествует проведение юстировки электрической оси антенн. Эту операцию во многих случаях можно производить, используя слежение за полетом летательного аппарата (самолета, вертолета) или внеземные источники радиоизлучения.

Электрической осью антенны называется направление максимальной излучаемой мощности при передаче сигнала или наибольшей чувствительности при его приеме. В направлении электрической оси диаграмма направленности антенны имеет максимум (здесь исключаются случаи диаграмм специальной формы, например, «двугорбые» диаграммы). Во многих случаях электрическая ось близко совпадает с геометрической осью симметрии отражающей поверхности зеркальной антенны или преломляющей поверхности линзовой антенны. Электрическая ось синфазных антенн обычно нормальная к плоскости, вдоль которой расположены элементы антенны. Однако электрическая ось антенны вследствие ряда причин чаще всего не совпадает точно с геометрической осью. В зеркальных и линзовых антеннах это может быть из-за смещения вторичного облучателя относительно геометрической оси, нарушения симметрии отражающей или преломляющей системы, влияния поверхности Земли, отклонения при монтаже антенны.

В синфазных антеннах различие электрической и геометрической осей происходит также вследствие нарушений условий фазировки отдельных элементов. Для систем с электрическим или механическим качанием диаграммы положение электрической оси оказывается зависящим от времени.

При вводе систем в эксплуатацию, послеремонтных работах и т. д. возникают задачи, связанные с юстировкой их электрической оси. Задачи юстировки могут быть двух типов:

1. Отыскание положения электрической оси, при котором параметры антенны оказываются наилучшими. Обычно это соответствует совпадению электрической оси с геометрической и совмещению фазового центра облучателя с фокусом зеркальной или линзовой антенны.

2. Привязка направления электрической оси антенны к отсчетным индикаторам (нониусам) шкал поворотных устройств или непосредственно к странам света (в случае неподвижных антенн).

При решении первой из указанных задач обычно приходится решать и вторую задачу, поскольку оказывается необходимым фиксировать направление электрической оси в процессе подбора оптимального ее положения.

Юстировку электрической оси оказывается целесообразным разбить на три этапа: 1) привязка индикаторов к геометрической оси антенны; 2) подбор оптимального положения облучателя (или фазировки элементов), соответствующего обычно приблизительному совпадению электрической и геометрической осей антенны; 3) определение поправок, которые необходимо вносить в значения отсчетов по шкалам для установки электрической оси антенны в заданное положение.

Геометрическая ось антенны должна быть зафиксирована при сооружении или монтаже. В случае зеркальных антенн, имеющих осевую симметрию, целесообразно встраивать в вершину зеркала оптический визир (зрительную трубу, теодолит), ось которого совпадает с осью симметрии. Если антенна монтируется с помощью ножевого шаблона, оптический визир может быть жестко связан с осью поворотов шаблона. До удаления шаблона из зеркала целесообразно установить дополнительный визир в стороне от оси. Сохранение параллельности осей основного и дополнительного визиров достигается одновременным наблюдением (при неподвижной антенне) прохождения летательного аппарата или выбранной небесной звезды через перекрестие двух визиров, один из которых установлен на новом, а другой на первоначальном месте.

Если летательный аппарат или небесная звезда пересекает перекрестия двух визиров неодновременно, то корректировкой дополнительного визира или его окулярного креста (при малых различиях) добиваются совпадения осей. Первый визир оказывается полезным в дальнейшем при точной установке облучателя на геометрической оси антенны, а второй (дополнительный) может служить для периодической проверки индикаторов шкал и для визуальных наблюдений.

За последние годы развитие радиолокации, радиосвязи и радиоастрономии потребовало создания больших антенн метрового, дециметрового и сантиметрового диапазонов волн. Для решения обеих задач юстировки таких антенн оказывается весьма плодотворным применение перспективных радиоастрономических методов. Поэтому рассмотрим подробнее процедуру юстировки электрической оси антенны при использовании внеземного источника малых угловых размеров (см. табл. 14.5).

Привязка индикаторов шкал к геометрической оси антенны может быть произведена следующим образом. С помощью «Астрономического ежегодника» выбирается одна из ярких звезд, кульминация которой происходит в ночное время в период юстировки. Рассчитывается время кульминации и высота звезды в момент кульминации. Геометрическая ось антенны устанавливается в меридиане (в направлении на Юг). Для этого к Югу от места установки должен быть выставлен репер едиными геодезическими методами. Поворотом антенны по азимуту оптический визир, жестко связанный с ней, устанавливается на репер. Затем антенна поднимается на рассчитанную высоту (угол места) прохождения звезды.

При приблизительно верной предварительной установке звезда появляется в поле зрения визира и проходит через вертикальную нить визира в момент, близкий к ее кульминации. Если звезда проходит в поле зрения выше горизонтальной нити визира, то антенна установлена ниже, чем следует; если звезда проходит ниже, — антенна установлена выше. Сделав несколько таких наблюдений с разными звездами (для этого полезно заранее рассчитать координаты и времена кульминации нескольких близко расположенных на небесной сфере звезд), можно сделать вывод о том, куда следует переместить индикаторы азимутальной и угломестной шкал, чтобы, пользуясь ими, устанавливать затем геометрическую ось антенны правильно.

После того как индикаторы шкал привязаны к геометрической оси антенны, а положение облучателя оптимизировано, необходимо убедиться в том, что электрическая ось приблизительно совпадает с геометрической.

Метод определения положения электрической оси антенны с помощью внеземных источников радиоизлучения аналогичен упомянутому выше методу привязки оси при использовании звезд [20].

Пусть электрическая ось антенны OL (рис. 18.2) смещена относительно геометрической оси OM на небольшой угол Δp. На небесной сфере с центром в точке O дуга Δp является стороной сферического треугольника LMN, стороны которого $NL = \Delta x$ и $MN = \Delta y$ находятся соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Очевидно, смещение в вертикальной плоскости $\Delta y = \Delta \varepsilon$ равно различию углов места электрической и геометрической осей антенны. Смещение в горизонтальной плоскости легко получить по формулам сферической тригонометрии. Юстировка электрической оси может быть сведена, таким образом, к нахождению углов Δx и Δy.

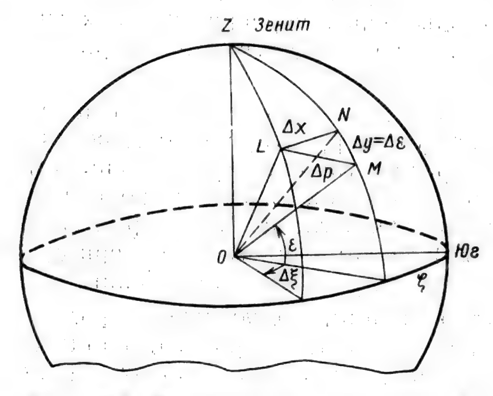


Рис. 18.2. К юстировке электрической оси антенны.

Целесообразно начинать юстировку с определения угла Δx, для этого необходимо, чтобы источник радиоизлучения, двигаясь по небесной сфере, пересекал диаграмму направленности антенны в горизонтальном направлении. Траектории светил горизонтальны в кульминациях. Поэтому для определения угла Δx необходимо выставить геометрическую ось антенны в плоскость меридиана. При этом пользуются индикатором азимутальной шкалы поворотного устройства.

Для дня измерений необходимо выбрать подходящий источник и вычислить для географической широты места измерений угол места источника в момент кульминации, а также азимуты и углы места для нескольких моментов времени, предшествующих кульминации и после нее.

Первоначальная юстировка обычно проводится в кульминации источника. Антенна заранее выставляется в меридиане ($\zeta = 0$) и на рассчитанный угол места ($\varepsilon_{кульм}$). Записывающий прибор готовится к работе так же, как и при снятии диаграммы направленности антенн (см. § 13.3). Запись имеет вид, представленный на рис. 13.3. По первой же записи, произведенной в кульминации, можно сделать вывод о величине угла Δx, а следовательно, и об азимутальной поправке. Для этого кривая прохождения источника (если заметны флюктуации, то проводится усредненная кривая) пересекается несколькими прямыми, параллельными линии нулевого уровня. Через середины получившихся отрезков проводится прямая, соответствующая максимуму кривой. Измеряется расстояние между соседними минутными метками времени Δl_1 (предварительно необходимо убедиться в неизменности скорости потяжки ленты самописца) и расстояние от

проведенной прямой до ближайшей предшествующей метки времени $\Delta l_{\text{макс}}$. Относящееся к этой метке декретное время

$$T_{\text{декр}} = T_{\text{хрн}} + \Delta a,$$

где $T_{\text{хрн}}$ — показание хронометра; Δa — поправка на ход хронометра.

Измерение расстояний на ленте позволяет определить интервал времени от $T_{\text{декр}}$ до момента прохождения максимума записи $T_{\text{макс}}$:

$$T_{\text{макс}} - T_{\text{декр}} = \Delta l_{\text{макс}} / \Delta l_1.$$

Откуда:

$$T_{\text{макс}} = T_{\text{хрн}} + \Delta a + \Delta l_{\text{макс}} / \Delta l_1.$$

Сравнение этого момента с рассчитанным значением момента кульминации источника $T_{\text{кульм}}$ позволяет определить величину и знак смещения Δx электрической оси антенны относительно геометрической оси. Если бы радиометр не обладал инерционностью, то различие моментов $T_{\text{макс}}$ и $T_{\text{кульм}}$ давало бы непосредственно искомую величину. Однако максимум выходного сигнала при прохождении источника через диаграмму наступает несколько позже — запаздывает на величину Δt, зависящую от постоянной времени фильтра низких частот τ радиометра. Поправка Δt определяется по графику, приведенному на рис. 18.3 ($t_{0,5}$ — время прохождения источником диаграммы направленности по уровню 0,5). Таким образом, различие моментов наступления максимума, наблюдаемого на записи, и расчетного, определяемого смещением осей, выражается формулой:

$$\Delta T = T_{\text{кульм}} + \Delta t - T_{\text{макс}}.$$

Тогда величина смещения (угол Δx) определяется выражением $\Delta x = \Omega \Delta T$, где Ω — угловая скорость движения источника по небесной сфере; $\Omega = \Omega_0 \cos \Theta$, $\Omega_0 = 15$ угл. мин за минуту времени, Θ — склонение источника, найденное на данное время наблюдения.

Окончательная формула, позволяющая определить поправку к показанию азимутальной шкалы, необходимую для наведения электрической оси антенны в заданное направление, такова [20]:

$$\Delta \zeta = 15 \cos \Theta \Delta T / \cos \varepsilon.$$

Для определения аналогичной поправки по углу места $\Delta \varepsilon$ поступают следующим образом. Для грубой оценки положения оси по углу места проводят несколько записей прохождения источника вблизи кульминации, вводя положительные и отрицательные поправки $\Delta \zeta$ относительно рассчитанных значений ε источника. При этом используют полученные ранее поправки $\Delta \zeta$. Если первоначальная установка была правильной, то введение поправок уменьшает величину максимума на записи прохождения как при $\Delta \varepsilon_1 > 0$, так и при $\Delta \varepsilon_1 < 0$. Если при введении поправки какого-либо одного знака макси-

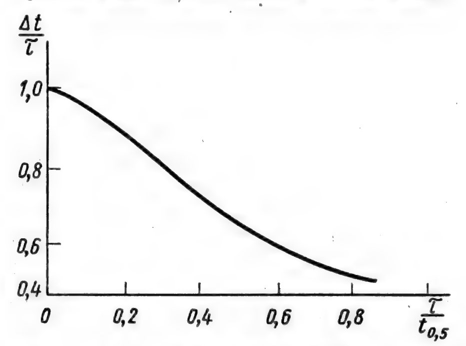


Рис. 18.3. График зависимости $\Delta t/\tau$ от $\tau/t_{0,5}$.

мальный сигнал возрастает, то это свидетельствует о том, что источник стал проходить ближе к электрической оси диаграммы. Следовательно, первоначальная установка была ошибочна.

Путем последовательных изменений поправки легко попасть «в вилку» и оценить величину $\Delta \varepsilon$. Величину $\Delta \varepsilon_1$ вначале следует брать равной примерно полуширине диаграммы направленности. Недостатками такой методики являются необходимость калибровки величины сигнала от измерения к измерению и относительно большое время, занимаемое юстировкой. После того, как поправка по углу места грубо оценена, а также необходимо ее уточнить, проводят измерение другим методом. Для определения величины $\Delta \varepsilon$ используют интенсивный дискретный источник радиоизлучения Кассиопея-А. Этот источник в северном полушарии между широтами 32° и 58° можно наблюдать не только в верхней, но и в нижней кульминации, а также во всех промежуточных положениях на небесной сфере. В частности, за сутки можно наблюдать источник Кассиопея-А в точках поворота его траектории, когда он движется при постоянном азимуте и проходит через вертикальное сечение диаграммы направленности антенны. Для этого антенна должна быть установлена на определенные азимуты, соответствующие точкам поворота, рассчитываемые для данной широты места наблюдения. Выставляя антенну в рассчитанное положение и пользуясь изложенной выше методикой для нахождения поправки $\Delta \zeta$, можно получить поправки $\Delta \varepsilon$.

18.4. МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПРОВЕРКИ РТС

Комплексная проверка РТС измерения координат и параметров объекта может быть осуществлена:

— методом непосредственной работы с объектами;
— путем приема сигнала, отраженного от местного предмета;
— с помощью стандартного отражателя;
— с помощью короткозамкнутой линии задержки;
— с помощью имитаторов и др.

Непосредственная работа производится как со специальными объектами, так и со случайными. Работа с реальными объектами является достоинством метода. Однако этот метод проверки связан с затратой технического ресурса, сил и времени обслуживающего состава, а также с отвлечением обеспечивающих объектов от выполнения ими основных задач. Для получения сопоставимых результатов необходимо обеспечить аналогичность условий работы по объектам и их расположению, однако эти требования не всегда можно выполнить. Иногда проведение такой проверки невозможно и по организационным соображениям.

В зоне действия системы могут находиться неподвижные местные объекты, сигналы от которых хорошо принимаются и наблюдаются. К таким объектам относятся вышки, трубы и другие сооружения. При проверке системы по этим объектам следует помнить, что амплитуда сигнала будет зависеть не только от параметров системы, но и от условий радионаблюдаемости, интерференционных явлений и пр. Кроме того, измерение уровня сигнала производится весьма приближенно. Хотя метод и не является оптимальным, он иногда используется в практике эксплуатации.

О техническом состоянии системы можно судить по превышению сигнала над уровнем шумов при работе по близкой «стандартной» цели. В качестве такой цели обычно используется стандартный отражатель, координаты которого известны с требуемой точностью. Для уменьшения мощности излучаемого и принимаемого сигнала в высокочастотный тракт системы вводят затухание (аттенюатор большой мощности). Регулируя величину затухания, искусственно снижают энергетический потенциал системы и отраженный сигнал доводят до уровня шумов приемника. Затухание, вносимое аттенюатором, будет характеризовать эффективность работы системы. Достоинство метода контроля — практическая независимость измерений от условий прохождения радиоволн, недостаток — необходимость установки в высокочастотном тракте специального аттенюатора большой мощности.

Метод самокалибровки заключается в том, что к волноводному тракту системы через направленный ответвитель подключается стабильная короткозамкнутая линия задержки. В линии происходит многократное отражение части энергии зондирующего импульса. Каждый раз, когда импульс достигает входа короткозамкнутой линии, часть энергии поступает в приемный тракт. На экране индикатора с линейной разверткой при этом наблюдаются калибрационные импульсы. Число импульсов будет косвенно характеризовать дальность действия системы.

На этом же принципе основана проверка РТС с помощью различного рода встроенных имитаторов.

Для контроля технического состояния системы широко используется метод имитации сигнала. В качестве имитаторов можно использо-

вать маломощные ответчики или эхо-резонатор. Последний часто входит в комплект системы. С помощью эхо-резонатора чаще всего оценивается общее техническое состояние системы (настройка, перепад мощностей), хотя в принципе грубо могут определяться: энергетический спектр импульсов передатчика, затягивание частоты магнетрона, генерирование на двух частотах и т. д. Основным достоинством контроля параметров с помощью эхо-резонаторов является простота и удобство.

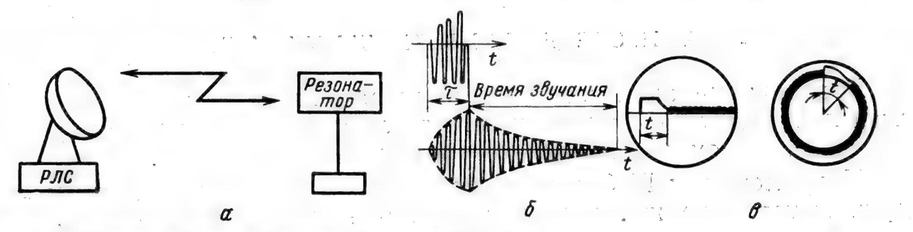


Рис. 18.4. Зондирующие импульсы передатчика (*а*), возбужденные колебания в объемном контуре эхо-резонатора (*б*), изображение на экране индикатора (*в*).

Принцип действия прибора состоит в следующем. Эхо-резонатор настраивается на частоту передатчика. Зондирующие импульсы передатчика (рис. 18.4,*а*) через элемент связи поступают в резонатор и возбуждают в объемном контуре колебания несущей частоты. Вследствие высокой добротности резонатора амплитуда этих колебаний за время импульса нарастает, а после его окончания спадает по экспоненциальному закону (рис. 18.4,*б*). Переизлученные колебания от эхо-резонатора принимаются приемником и просматриваются на экране индикатора (рис. 18.4,*в*). Время от начала до конца переизлучения называется длительностью звучания и определяется по формуле [29]

$$t_{\text{зв}} = T_{\text{зв}} \ln (KP_{\text{и}}/P_{\text{пр}}), \tag{18.1}$$

где $T_{\text{зв}}$ — постоянная времени, зависящая от добротности резонатора и коэффициента связи высокочастотного тракта с резонатором; K — постоянная, зависящая от коэффициента связи высокочастотного тракта с резонатором, длительности и амплитуды импульса, $P_{\text{и}}/P_{\text{пр}}$ — перепад мощности.

С помощью эхо-резонатора производится не абсолютное измерение параметров, а контроль их изменения. Следовательно, контролю параметров системы с помощью эхо-резонатора должна предшествовать его калибровка. Калибровка должна производиться на технически исправной системе при определенной связи с резонатором. Процесс калибровки заключается в настройке эхо-резонатора на частоту передатчика. Оптимальному значению настройки соответствует максимальное показание индикатора резонатора. Затем по сигналам резонатора настраивают приемник. При оптимальной настройке приемника сигнал от эхо-резонатора на индикаторе имеет наибольшую длительность звучания. Полученное значение длительности звучания характеризует настроенную систему и принимается за основу при контроле ее параметров.

В дальнейшем при контроле частоты передатчика эхо-резонатор настраивается на его частоту по максимальному отклонению стрелки индикатора. По отсчитанному значению отклонения стрелки индикатора и градуировочным таблицам определяется частота передатчика. Ошибка в определении не превосходит $\pm 2 \cdot 10^{-4}$.

Как видно из (18.1), уменьшение перепада мощности свидетельствует о снижении либо мощности передатчика, либо чувствительности приемника. Для исключения неоднозначности контролируется мощность передатчика. Поскольку отклонение стрелки индикатора эхо-резонатора пропорционально мощности передатчика, то, сопоставляя показания этого прибора с показаниями, полученными во время калибровки, оценивают изменение мощности передатчика.

18.5. ПРОВЕДЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАПИСЕЙ

Контрольные записи дальности производятся для определения и учета поправок за счет задержек сигнала в различных цепях системы, а также поправок, обусловленных состоянием атмосферы.

Например, для РТС с активным ответом [30] запросный сигнал задерживается в тракте бортового прибора, а ответный — в приемном устройстве, устройствах автосопровождения и регистрации.

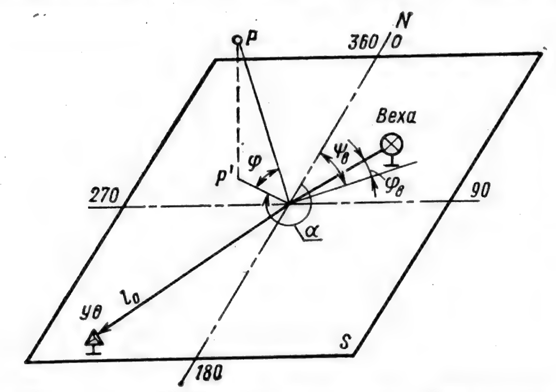


Рис. 18.5. Расположение уголкового отражателя в вехе на плоскости.

Контрольная запись угловых координат проводится для определения и введения поправок в угловые значения азимута и угла места.

Указанные поправки вводятся в вычислительные машины, а контрольные записи используются в качестве начала отсчета соответствующих координат и параметров при обработке результатов измерений.

Для проведения контрольных записей по дальности и угловым координатам в комплекте оборудования РТС должны быть: уголковый отражатель и веха (геодезический ре́пер). На рис. 18.5 показано расположение уголкового отражателя и вехи на горизонтальной плоскости.

Контрольные значения дальности, азимута и угла места обозначены соответственно l_0, $\psi_в$, $\varphi_в$.

Уголковый отражатель устанавливается на необходимом расстоянии от центра антенной колонки, а геодезическая дальность до него должна быть известна с определенной точностью. В секторе установки уголкового отражателя не должны находиться предметы, дающие отражение сигнала, сравнимое по интенсивности с сигналами от уголкового отражателя.

Проведение контрольной записи возможно и по местному предмету, геодезическая наклонная дальность до которого от центра антенной колонки известна с требуемой точностью. В качестве такого предмета может использоваться высокая труба, водонапорная башня и т. д. Проведение контрольной записи по местному контрольному предмету возможно лишь в том случае, если отраженный сигнал обладает достаточной интенсивностью, а в зоне местного предмета нет других объектов, интенсивно отражающих сигнал.

Веха располагается на требуемом расстоянии от антенной колонки, а азимут и угол места ее перекрестия известны с необходимой точностью.

Для проведения контрольной записи по дальности в сторону уголкового отражателя или местного контрольного предмета посылается зондирующий импульс и принимается отраженный. Измеренное таким образом расстояние принимается равным геодезической дальности $l_{0г}$.

Контрольная запись угловых координат производится по выставленной вехе. Для учета люфта в осях антенной колонки контрольную запись угловых координат проводят дважды: при подводке антенны к вехе справа и слева (для азимута), сверху и снизу (для угла места).

Если наведение на веху производится по оптическому визиру, а автосопровождение объекта осуществляется по электрической оси антенны, то в контрольной записи угловых координат следует учитывать визирные ошибки из-за несоосности оптической и электрической оси антенны. Визирные ошибки определяются при облетах РТС.

18.6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ПРИ РАБОТЕ РТК

При одновременной работе нескольких РТС (РТК) создаются непреднамеренные взаимные радиопомехи, затрудняющие прием полезных радиосигналов. Взаимные радиопомехи возможны вследствие перекрытия спектров основных сигналов, излучаемых радиопередатчиками. Они получаются также за счет паразитных излучений передатчиков, излучений гетеродинов приемников и других источников высокочастотных колебаний, которые возникают вследствие несовершенства методов модуляции (например, перемодуляции) или из-за конструктивных и схемных недостатков (плохой экранировки, недостаточной фильтрации на выходе передатчиков и т. п.).

Возникновению взаимных радиопомех в ряде случаев способствует чрезмерное увеличение излучаемой мощности передатчика и чувствительности приемника при желании получить надежное перекрытие заданной дальности.

Взаимные помехи можно разделить на две основные группы.

1. Радиопомехи, создаваемые радиопередатчиками систем, у которых спектры основных излучений перекрываются или совпадают. Такие системы считаются работающими в общих полосах частот.

2. Радиопомехи, создаваемые радиопередатчиками систем, работающими с неперекрывающимися спектрами основных излучений. Такие системы считаются работающими в различных обособленных полосах частот.

Для каждой из этих групп условия электромагнитной совместимости (ЭМС) будут различными.

Уровень радиопомех первой группы будет зависеть от мощности сигналов, излучаемых в основных (рабочих) полосах частот. Снижение уровня взаимных радиопомех этой группы не может решаться установкой на входе приемников фильтрующих элементов.

Уровень радиопомех второй группы будет определяться мощностью не основных, а побочных излучений передатчиков. Следовательно, борьба с этими видами помех сводится к уменьшению побочных излучений.

К проблемам ЭМС в период эксплуатации РТК относятся такие как: распределение рабочих частот между системами, выбор времени

и продолжительности работы, оптимальный выбор мощности передатчика и чувствительности приемника для обеспечения заданной дальности связи, учет секторов работы РТС и т. д.

В качестве критерия оценки ЭМС предполагается [12] принять величину ослабления мешающего сигнала при прохождении его совместно с полезным от входа приемника до выхода канала

$$K_{\text{осл}}=(P_{\text{с}}/P_{\text{м}})_{\text{вых}}/(P_{\text{с}}/P_{\text{м}})_{\text{вх}}$$

или в децибелах

$$\mathscr{K}_{\text{осл}}=10\lg K_{\text{осл}}\ [\text{дБ}],$$

где $P_{\text{с вх}}$, $P_{\text{м вх}}$ — мощности основного и мешающего сигналов на входе приемника; $P_{\text{с вых}}$, $P_{\text{м вых}}$ — мощности основного и мешающего сигналов на выходе приемника.

Величина $K_{\text{осл}}$ зависит от вида модуляции, особенностей энергетического спектра полезного и мешающего сигналов, а также от методов приема и обработки полезной информации. Чем большее значение $K_{\text{осл}}$ имеет система, тем она меньше подвержена воздействию мешающих сигналов, или другими словами, будет более приспособлена к совместной работе в полосе частот.

В качестве других критериев ЭМС могут приниматься:

— стабильность частоты излучаемых колебаний;

— интенсивность побочных излучений и гармоник;

— эффективность работы избирательных элементов, уменьшающих возможность приема внеполосных излучений и т. д.

Для эффективной совместной работы различных РТС необходимо принять ряд организационно-технических мер.

Распределение рабочих частот должно быть произведено с расчетом повторения их в системах, зоны действия которых не перекрываются.

Необходимо предусмотреть работу с разносом не только по частоте, но и по времени. При этом продолжительность работы должна быть минимально необходимой.

Для получения максимального значения ослабления мешающего сигнала следует знать и учитывать энергетические спектры полезного и мешающего сигналов, воздействующих на вход приемного устройства.

Работу РТС надо планировать с учетом зависимости изменения помех во времени, которая в значительной степени определяется характером перемещения антенн системы и особенностями их диаграмм направленности.

Уровень полезного и мешающего сигналов на входе приемника зависит от взаимной ориентации антенных устройств совместно работающих систем. Поэтому эта ориентация должна быть такова, чтобы сигналы от одной системы не попадали на вход приемника другой системы. При невозможности осуществления этого следует максимально разнести рабочие частоты.

Во всех противоречивых случаях для эффективной совместной работы различных РТС надо искать оптимальное решение.

Глава 19

МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ НА РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

Правила работы на электроустановках и СВЧ приборах регламентируются официальными документами [26, 33]. Вопросы техники безопасности при работе подробно излагаются в целом ряде книг [11, 19, 42]. В настоящей главе эти вопросы рассматриваются применительно к работе на радиотехнических устройствах, системах и комплексе в целом.

19.1. ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Основным поражающим фактором является электрический ток, проходящий через тело человека. Выделяют два вида поражения электрическим током: электрические травмы и электрические удары. Эти поражения резко отличаются друг от друга.

Электрические травмы представляют собой местные поражения тканей и органов электрическим током. Характерными видами электрических травм являются: ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, механические повреждения.

Электрический ожог — самая распространенная электротравма. Различают три вида ожогов:

— контактный, возникающий при прохождении тока через тело человека в результате непосредственного контакта с токоведущей частью;

— дуговой, обусловленный воздействием на тело человека электрической дуги;

— смешанный, являющийся результатом действия одновременно электрической дуги и прохождения тока через тело человека.

Электрические знаки (метки тока) возникают при хорошем контакте с токоведущими частями. Они представляют собой припухлость с затвердевшей в виде мозолей кожей желтого или зеленоватого цвета, обычно круглой или овальной формы. Края электрического знака резко очерчены белой или серой каймой.

Электрометаллизация кожи связана с проникновением в кожу мельчайших частичек расплавленного под действием электрической дуги металла. Такое явление встречается при коротких замыканиях.

Механические повреждения являются следствием резких непроизвольных судорожных сокращений мышц под действием тока, проходящего через тело человека, из-за чего могут произойти разрывы кожи, кровеносных сосудов, нервной ткани и т. д.

Электрический удар (шок) происходит в результате раздражения и возбуждения живых тканей человека протекающим током. Воздействие тока на нервную систему и мышцы может привести к параличу пораженных органов. Паралич дыхательных органов или мышц сердца может закончиться прекращением их деятельности. Одновременно электрический ток может оказывать непосредственно тепловое и динамическое воздействие, вызывать электролизные процессы в организме.

Степень электрического поражения зависит от ряда факторов: индивидуальных особенностей людей, сопротивления тела человека, пути тока в организме, рода и частоты электрического тока, продолжительности пребывания под током, величины приложенного напряжения, условий внешней среды и т. д.

Индивидуальные особенности людей в значительной степени определяют исход поражения. Ток, вызывающий слабые ощущения у одних людей, может быть опасным для других. Характер воздействия при одной и той же величине тока зависит от состояния нервной системы и всего организма в целом, а также от веса человека, его физического развития. На исход поражения также влияет путь тока в теле человека. Ток в теле человека проходит не обязательно по кратчайшему пути, объясняется это разницей в удельном сопротивлении тканей. Сопротивление человека — величина нелинейная, зависящая от многих факторов. Наибольшим электрическим сопротивлением в теле человека обладает верхний роговой слой кожи (3... 100 кОм). При снятом роговом слое кожи сопротивление внутренних тканей понижается.

Сопротивление одного и того же участка кожи зависит от увлажнения, потовыделения, загрязнения, повреждения рогового слоя и т. п. Сопротивление различных участков кожи также различно. Таким образом, сопротивление тела человека в целом зависит от состояния кожи, места приложения электродов, их площади и может изменяться в широких пределах.

Установлено, что сопротивление тела человека постоянному току выше, чем переменному любой частоты. Разница в значениях сопротивлений постоянному и переменному токам особенно велика при малых напряжениях до 5 ... 10 В. С ростом приложенного напряжения эта разница уменьшается.

Длительность протекания тока заметно влияет на величину сопротивления тела человека и в первую очередь на основную составляющую — сопротивление кожи, это связано с изменениями, которые происходят в коже и других тканях. С увеличением времени прохождения тока через тело человека и повышением напряжения полное сопротивление его уменьшается.

Особенно резкое падение сопротивления наблюдается при напряжениях 40...50 В, когда полное сопротивление тела человека оказывается равным [11] примерно 1,8 ... 2,2 кОм. При больших напряжениях сопротивление приближается к 300 Ом.

Из числа факторов внешней среды, влияющих на сопротивление тела человека, следует отметить температуру и давление воздуха, а из числа внутренних факторов утомление, болезненное состояние и пр.

На основании опытных данных приводятся следующие пороговые значения токов.

1. *Ощутимый ток.* Это наименьшая величина тока, ощущаемая человеком. Для переменного тока частоты 50 Гц она составляет 0,6... 1,5 мА. Воздействие переменного тока ощущается в виде «зуда» и легкого покалывания, а постоянного тока в виде нагрева кожи на участке касания токоведущей части.

2. *Неотпускающий ток* — наименьшая величина тока, при котором человек не может самостоятельно освободиться от захваченных электродов. Для переменного тока частоты 50 Гц этот ток составляет 10...15 мА.

3. *Смертельный ток.* Для частоты 50 Гц это ток более 100 мА, а для постоянного — более 300 мА.

Величина допустимого тока не должна превышать значения, при котором появляется реальная опасность. Для нормальных условий эксплуатации это значение тока не должно превышать 10 мА.

При кратковременных действиях тока значение его не должно превышать величины, приводящей к параличу.

В табл. 19.1 приведены наибольшие допустимые для человека синусоидальные токи частоты 50 Гц в зависимости от длительности их прохождения.

Первая помощь пострадавшему[1] от электрического тока состоит из двух этапов: освобождение пострадавшего от действия тока и оказание ему медицинской помощи.

Поскольку исход поражения зависит от длительности воздействия тока на человека, то очень важно быстрое освобождение пострадавшего от тока. Первым действием для освобождения пострадавшего от тока должно быть быстрое отключение напряжения. Отключение производится с помощью ближайшего выключателя, рубильника или иного отключающего элемента. При невозможности быстрого отключения установки необходимо принять меры к отделению пострадавшего от токоведущих частей, к которым он прикасается. Меры эти различны.

[1] Более подробно см. [26], приложение X.

Они зависят от напряжения электроустановки, окружающих условий, наличия подходящих приспособлений, предметов и т. д. В установках с напряжением до 400 В пострадавшего можно оттянуть от токоведущих частей, взявшись за его одежду, если она сухая. Пользуясь сухой палкой, можно отбросить провод. В некоторых случаях провод следует перерубить или перекусить инструментом с изолированной ручкой. В установках с напряжением свыше 400 В при отделении пострадавшего — одевать диэлектрические перчатки, боты, изолирующие приспособления.

Таблица 19.1

Значения тока и напряжения допустимые для человека

Время действия тока на человека, с	0,2	0,5	0,7	1	30
Допустимый ток через человека, мА	250	100	75	65	6
Допустимое напряжение прикосновения, В	175	100	80	75	18

Во всех случаях надо следить за тем, чтобы самому не оказаться в контакте с токоведущей частью или с телом пострадавшего.

Меры помощи зависят от состояния пострадавшего после освобождения его от действия тока.

Если пострадавший в сознании, но до этого был в состоянии обморока, ему следует обеспечить полный покой, наблюдать за пульсом и дыханием до прибытия врача, который должен быть немедленно вызван. Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но дыхание устойчиво, его следует уложить, обеспечить приток свежего воздуха, расстегнуть одежду, к носу поднести вату, смоченную нашатырным спиртом. Обеспечить полный покой до прибытия врача. Если пострадавший плохо дышит, необходимо сделать искусственное дыхание.

19.2. ДОПУСК ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА К ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК, МЕРЫ И СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ПРИ РАБОТЕ

К самостоятельной работе на электроустановках допускаются лица, прошедшие медицинское освидетельствование и имеющие соответствующую классификационную группу по правилам и мерам электробезопасности.

Лица, допущенные к эксплуатации электроустановок, обязаны:

а) знать правила по эксплуатации систем электроснабжения и регламентные работы на оборудовании в объеме, соответствующем занимаемой должности и выполняемым служебным обязанностям;

б) иметь практические навыки по эксплуатации электрооборудования;

в) знать электрические схемы электроустановок согласно своим служебным обязанностям;

г) знать инструкции по эксплуатации электроустановок и меры безопасности;

д) уметь пользоваться защитными средствами;

е) уметь практически оказывать первую помощь пострадавшим от электрического тока;

ж) уметь пользоваться средствами тушения пожара в электроустановках.

При переводе на другую работу, связанную с эксплуатацией электроустановок, каждый работник должен пройти обучение и инструктаж на рабочем месте. Обучение обслуживающего персонала должно производиться под руководством опытных специалистов, знающих данную установку и имеющих допуск к самостоятельной работе на ней. После прохождения срока обучения специально назначенная квалификационная комиссия проверяет знания и практические навыки для допуска к самостоятельной работе.

Для обеспечения безопасности в процессе эксплуатации электроустановок применяется целый ряд технических защитных мер. Среди них: использование малых напряжений, контроль изоляции, ограждение и блокировка, защитное заземление, защитное отключение и т. д.

Наибольшая степень безопасности достигается при малых напряжениях. Поэтому во всех случаях, когда это возможно, следует применять пониженные напряжения.

Состояние изоляции в значительной мере определяет степень безопасности эксплуатации электроустановки. С целью обнаружения дефектов и предупреждения замыканий на землю и коротких замыканий должен осуществляться периодический контроль изоляции. При измерении определяется сопротивление изоляции отдельных участков сети линии электрических аппаратов, трансформаторов, двигателей и т. п. Сопротивление изоляции одного участка в сетях с напряжением до 1000 В должно быть не ниже 0,5 мОм. Для электрических аппаратов, машин нормы другие, поэтому они от сети отключаются и измерение их изоляции производится отдельно.

Прикосновение к токоведущим частям всегда является опасным. Чтобы исключить возможность прикосновения или опасного приближения к неизолированным токоведущим частям, применяются ограждения и блокировки. Используются ограждения сплошные, сетчатые, в виде кожухов, крышек и т. д.

Электрические блокировки осуществляют разрыв электрической цепи специальными контактами, которые устанавливаются на дверцах ограждений, крышках кожухов и пр. С помощью защитных заземлений осуществляют намеренное соединение нетоконесущих частей, которые могут случайно оказаться под напряжением.

Часто, кроме основной изоляции токонесущих частей, изолируются и нетоконесущие части, которые могут оказаться под напряжением. Такая изоляция получила название «двойной изоляции». Наиболее простой двойной изоляцией является покрытие металлических корпусов, рукояток электрооборудования слоем изоляционного материала. Состояние этого слоя следует контролировать. Более эффективным в этом смысле является способ изготовления корпусов, рукояток и пр. из изолирующих материалов.

Защитное отключение представляет собой систему защиты, автоматически отключающую электроустановку при возникновении опасности поражения человека электрическим током.

Повреждение электроустановки приводит к изменениям некоторых параметров, которые могут быть использованы как входные величины автоматического устройства, осуществляющего защитное отключение. В РТС рассмотренные меры защиты применяются комплексно.

Помимо мер защиты, важную роль в обеспечении безопасности персонала при эксплуатации играют различные защитные и предохранительные средства и предохранительные приспособления.

Защитными средствами в электроустановках называются приборы, аппараты, переносные приспособления и устройства, служащие для защиты персонала от поражения электрическим током. К защитным средствам, применяемым в электроустановках, относятся следующие приборы и приспособления:

а) изолирующие средства;

б) переносные заземления;

в) временные ограждения, предупредительные плакаты и пр.

Изолирующие защитные средства служат для изоляции человека от токоведущих частей электрооборудования, а также от земли. К изолирующим защитным средствам относятся: диэлектрические изделия из резины: обувь (галоши, боты), перчатки, инструмент с изолированными рукоятками и т. д. Эти средства используются в процессе обслуживания работающих электроустановок (оперативные переключения, ремонт, испытание). Они изготовляются из резины высокого качества, должны иметь соответствующие размеры и быть удобными при пользовании. Особенно это относится к диэлектрическим перчаткам, которые чаще всего используются персоналом.

Переносные заземления являются наиболее надежным защитным средством при работе на отключенном электрооборудовании на случай ошибочной подачи на них напряжения. С помощью их токонесущие части замыкаются накоротко на землю. При ошибочной подаче напряжения обеспечивается отключение электроустановки за счет автоматики или перегорания плавких предохранителей. Переносные заземления изготовляются из гибкого медного провода с поперечным сечением жил, рассчитанным на термическую устойчивость при прохождении токов короткого замыкания.

Для безопасности работы могут использоваться временные заграждения.

К защитным средствам относятся специальные плакаты, которые служат для предупреждения об опасности приближения к частям, находящимся под напряжением, напоминают о принятии мер безопасности или запрещают включать напряжение.

19.3. ВОЗДЕЙСТВИЕ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧЕЛОВЕКА, ДОПУСТИМЫЕ НОРМЫ И ИХ КОНТРОЛЬ

Работа РТС связана с излучением СВЧ колебаний, интенсивность которых зависит от типа и мощности генератора, диапазона частот и способа использования энергии, ширины диаграммы направленности антенны, коэффициента усиления и подъема ее над уровнем поверхности земли, наличия утечек в элементах антенно-волноводного тракта и т. д.

Можно выделить две группы работ, при которых происходит СВЧ излучение:

1. Работы, связанные с регулировкой, настройкой испытанием СВЧ узлов, блоков и системы в целом. Здесь источником излучения могут быть открытые концы волноводов, утечки в элементах антенно-волноводного тракта и сама антенна.

Воздействие СВЧ излучений может быть как на персонал, занятый работой, так и на находящийся вблизи источника излучений.

2. При непосредственной работе на системе, когда источником СВЧ излучений является антенное устройство. Хотя в этом случае операторы большую часть времени находятся внутри кабины или в помещении, однако СВЧ излучения могут воздействовать на окружающих. Интенсивность этого воздействия зависит от местонахождения их по отношению к излучателю.

Степень воздействия СВЧ колебаний зависит от интенсивности источника и расстояния до него, длительности облучения и индивидуальной чувствительности организма.

Энергия СВЧ, падающая на поверхность тела человека, частично отражается, а частично поглощается, проникая в глубину ткани. Степень отражения энергии от поверхности тела человека и глубина проникновения ее зависят от длины волны и жирового слоя на участке облучения. В [19] приведены количественные характеристики этих зависимостей.

Такие органы, как головной и спинной мозг имеют незначительный жировой слой, а глаза — совсем не имеют. Следовательно, эти органы наиболее подвержены воздействию СВЧ.

Длительное и систематическое воздействие СВЧ энергии с интенсивностью, превышающей предельно допустимые величины, оказывает неблагоприятное действие на организм человека. Это выражается в нарушении функционального состояния нервной и сердечно-сосудистой системы; появлении головной боли, нарушении сна, повышении раздражительности, замедлении пульса, повышении кровяного давления и т. д. При достаточно большой интенсивности облучения возможна катаракта (помутнение хрусталика глаз).

Функциональные нарушения в ранней стадии, вызванные действием СВЧ, являются обратимыми, если прекратить контакт с излучением или улучшить условия труда. Одним из ранних признаков воздействия энергии СВЧ являются изменения в крови и снижение обонятельной чувствительности человека.

Для предупреждения неблагоприятного действия СВЧ необходимо соблюдать меры защиты. Интенсивность электромагнитного поля в диапазоне СВЧ оценивается величиной плотности потока мощности (ППМ) и выражается в микроваттах, милливаттах и ваттах на квадратный сантиметр (мкВт/см², мВт/см², Вт/см²). Плотность потока мощности — это энергия, проходящая в 1 с через 1 см² поверхности, перпендикулярной направлению распространения.

В местах работы с генераторами СВЧ интенсивность облучения не должна превышать следующих предельно допустимых значений [33]:

— при облучении в течение всего рабочего дня — не более 10 мкВ/см²;

— при облучении в течение 2-х часов за рабочий день — 100 мкВт/см²;

— при облучении в течение 15 ... 20 мин за рабочий день не более 1000 мкВт/см² при условии обязательного пользования очками;

— для лиц, не связанных профессионально с облучением, и для населения интенсивность облучения не должна превышать 1 мкВт/см².

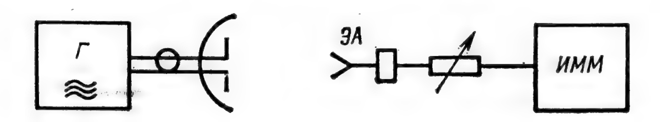


Рис. 19.1. Схема соединения приборов для измерения плотности потока мощности.

Для измерения ППМ на рабочих местах и для обнаружения мест утечек СВЧ энергии используются измерители малых мощностей (ИММ). На вход ИММ через аттенюатор подключается эталонная антенна (ЭА) (рис. 19.1). Подсоединение ИММ к ЭА осуществляется коаксиальным волноводом, затухание которого заранее известно.

Плотность потока мощности $П$ в раскрыве антенны с учетом затухания в волноводном тракте определяется по формуле

$$П = \frac{P_{ср} K_{ат}}{S_{д} \eta_{т}} \left[\frac{мкВт}{см^2} \right], \qquad (19.1)$$

где $P_{ср}$ — мощность в мкВт, отсчитываемая по шкале прибора; $K_{ат}$ — величина ослабления (в разах) аттенюатора и высокочастотного тракта, соединяющего ИММ с ЭА; $S_{д}$ — действующая

площадь антенны в см²; η — к. п. д. головки.

Для измерения плотности потока мощности промышленностью выпускается комплект аппаратуры типа ПЗ-9 [28]. Прибор измеряет ППМ непрерывных и средние значения импульсно-модулированных излучений с точностью 30...36%. Диапазон рабочих частот ПЗ-9 зависит от комплектности прибора (табл. 19.2). В комплект прибора каждого **диапазона входит:**

— измеритель мощности с блоком питания;

— тренога для установки измерительных антенн;

— универсальная поворотная головка с кронштейном для крепления на треноге.

Наличие в каждом диапазоне антенн с различными величинами действующих площадей позволяет без аттенюатора расширить предел измерения ППМ.

Измерения ППМ должны проводиться при максимальной мощности генератора СВЧ. Если работа генератора при максимальной мощности невозможна, то измерения следует проводить при мощности, уменьшенной в n раз, с последующим умножением измеренной ППМ на n.

Таблица 19.2

Основные характеристики измерителя плотности потока мощности ПЗ-9

Комплект	Диапазон рабочих частот, ГГц	Диапазон измерений, мВт/см²	ВЧ тракт		КСВ
			коаксиальный, Ом	волноводный, мм	
А	0,3...5,6	0,3...10,7	50	16×7	1,5
Б	5,6...16,7	0,87...8,7	—	35×15	1,6
В	16,7...37,5	0,78...2	—	11×5,5 7,2×3,4	1,5
Г	0,3...37,5	соответствует диапазону А, Б, В	—	—	—

За уровнем интенсивности СВЧ излучения должен осуществляться систематический контроль. Для помещений, где расположены генераторы, снимается план-карта уровней СВЧ излучений, на которой отмечаются места с наибольшей интенсивностью. Если уровень интенсивности отдельных мест превосходит допустимые значения, следует принимать меры к его снижению.

Контрольные измерения уровней интенсивности СВЧ должны производиться не реже двух раз в год. При установке новых источников СВЧ или изменении их взаимного расположения, необходимо произвести уточнение мест с максимальной интенсивностью.

Установка РТС на аэродромах, полигонах и других местах работы должна производиться так, чтобы исключить возможность облучения окон, дверей, а также отражений излучений на рабочие места расчетов. Антенны должны размещаться над служебными помещениями, в которых находится соответствующая аппаратура.

Для различных условий распространения радиоволн плотность потока мощности может быть подсчитана по методике, изложенной в [19].

Для принятого расположения РТС снимается диаграмма напряженности СВЧ поля. Снятие диаграммы производится в полярных координатах для различных углов наклона к плоскости горизонта. При одновременной работе нескольких систем на одинаковых частотах измеряется суммарная величина напряженности поля. Плотность потока мощности от прямого луча передающего устройства на расстоянии l от антенны рассчитывается по формуле:

$$П_l = P_п G_{пер} / 4\pi l^2, \qquad (19.2)$$

где $P_{п}$ — мощность радиопередатчика; $G_{пер}$ — коэффициент направленности передающей антенны.

Зоны излучений с уровнем ППМ выше допустимых обозначаются предупредительными знаками.

Маршруты движения обслуживающего персонала на территории радиотехнического объекта устанавливаются таким образом, чтобы они не проходили вблизи мест с максимальной интенсивностью СВЧ поля.

При одновременной работе нескольких систем не допускается излучение одной системы в сторону другой.

При непосредственной работе на системе необходимо убедиться в отсутствии утечек СВЧ энергии в линиях передачи, сочлененных элементов волноводного тракта и т. д.

Во всех случаях, когда уровень СВЧ излучений оказывается выше допустимых значений, необходимо принять меры к его ослаблению или защите персонала.

При проведении работ в зоне с интенсивностью излучения СВЧ выше допустимой, необходимо применять передвижные защитные экраны и индивидуальные средства защиты.

19.4. МЕРЫ И СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ОТ СВЧ ОБЛУЧЕНИЯ

Для снижения интенсивности СВЧ поля применяются следующие меры:

1. Уменьшение излучения непосредственно в самом источнике излучения (антенне, открытом волноводе и пр.).
2. Экранирование источника излучения.
3. Экранирование рабочего места у источника излучения или удаление его от источника.
4. Индивидуальные средства защиты.

Указанные способы могут применяться каждый в отдельности или в сочетании. Применение средств защиты не должно вызывать существенного искажения СВЧ поля у антенны и ухудшать удобства в работе.

Уменьшение излучения источника. При проверке работы отдельных устройств системы, а также измерении ее выходных параметров (частоты, мощности, ширины спектра и т. д.) в различных режимах рекомендуется использовать поглотители мощности (эквиваленты антенны). Применение поглотителей мощности в качестве нагрузки устраняет самый интенсивный источник излучения — антенну. В зависимости от типа поглотителей может обеспечиваться затухание энергии до 40 и даже 60 дБ.

При проверке работы индикаторного, приемного, антенного устройства, а также схемы автоматики и управления РЛС следует использовать искусственные имитаторы цели. В этом случае работает вся система, за исключением передающего устройства. Имитация отраженного сигнала производится от искусственного маломощного источника СВЧ энергии, частота которого должна соответствовать частоте РЛС. Имитация дальности до цели осуществляется сдвигом во времени запускающего сигнала в индикаторном устройстве с генерируемым импульсом имитатора цели.

При снятии диаграмм направленности антенных устройств, проверке режимов работы (вращение системы или антенны и пр.) следует работать с пониженными мощностями или использовать волноводные

ответвители, делители мощности, волноводные ослабители, которые присоединяются между волноводным трактом и антенной. При этом в антенну подается только небольшая часть мощности, бо́льшая же ее часть направляется в поглотитель. При использовании полной мощности передатчика время работы должно быть максимально сокращено.

Экранирование источника излучения. Для защиты от СВЧ энергии целесообразно экранировать источник излучения. При этом экраны не должны нарушать процессы работы (настройки, регулировки, испытания и пр.). По принципу действия экраны делятся на две группы: отражающие и поглощающие. Для первой группы экранов следует применять материалы с высокой, а для второй — с низкой электропроводимостью (полупроводники, диэлектрики с большими потерями).

В зависимости от мощности источника частоты, удобства работы могут быть использованы сплошные металлические, сетчатые металлические, мягкие металлические с хлопчатобумажной или другой ниткой экраны. Сплошные металлические экраны обеспечивают надежное экранирование практически при любых встречающихся интенсивностях СВЧ полей. Глубина проникновения электромагнитной энергии в волновой зоне для металлического экрана определяется из выражения

$$h = -0{,}5 \ln q_{осл} / \sqrt{0{,}5\omega\gamma\mu},$$

где $q_{осл} = П_{пд}/П_x$ — степень ослабления электромагнитного поля, $П_{пд}$ — предельно допустимая плотность потока мощности, применяется по санитарным нормам [см. § 19.3]; γ — электрическая проводимость материала экрана, 1/Ом·см; μ — магнитная проницаемость материала экрана, Г/м.

Пример 19.1. Известны следующие данные: $P_п = 500$ Вт; $\lambda = 15$ см, $f = 3\cdot10^6$ кГц; $G_{пер} = 500$; $l = 15$ м; материал экрана — алюминий $\gamma = 3{,}54 \times 10^5$ 1/Ом·см, $\mu = 4\pi\cdot10^{-9}$ Г/м.

Рассчитать защиту рабочего места от прямого луча радиопередающего устройства.

Решение. Определим плотность потока мощности на расстоянии 15 м от передающего устройства

$$П_x = \frac{P_п G_{пер}}{4\pi l^2} = \frac{500\cdot500\cdot10^6}{4\pi\,(15\cdot100)^2} = 20\cdot10^3 \text{ мкВт/см}^2.$$

Рассчитываем необходимую кратность ослабления, для $П_{пд} = 10$ мкВт/см²

$$q_{осл} = П_{пд}/П_x = 10/20\cdot10^3 = 5\cdot10^{-4}.$$

Необходимая толщина экрана будет равна

$$h = -0{,}5 \ln q_{осл}/\sqrt{0{,}5\omega\gamma\mu} = -0{,}5 \ln 5 \times 10^{-4}/\sqrt{0{,}5\cdot2\pi\cdot3\cdot10^9\cdot3{,}54\cdot10^5\cdot4\pi\cdot10^{-9}} = 0{,}0059 \text{ мм}.$$

Толщину экрана следует выбирать по конструктивным соображениям. При толщине экрана, равной 0,01 мм, поле СВЧ ослабляется на 50 дБ.

Сетчатые экраны, по сравнению со сплошными, обладают худшими экранирующими свойствами. Однако в ряде случаев такие экраны с успехом используются. Интенсивность ослабления металлической сетки по приведенной выше методике оценить невозможно в виду сложности определения коэффициента связи через сетку. Ослабление сетчатых экранов зависит от густоты сетки (числа ячеек на квадратный сантиметр), материала и толщины проволоки (табл. 19.3).

Экран из сеток надо выбирать с размером ячеек значительно меньше длины волны излучения. Рассчитав необходимую степень ослабления потока мощности на рабочем месте и пользуясь экспериментальными данными по ослаблению, выбирают тип сетчатого экрана.

Широко используются две формы экранов: замкнутого и незамкнутого вида. Примером замкнутого экрана может служить металличе-

ский каркас шкафа передатчика. Размеры экранированной камеры определяются величиной источника излучения, удобствами работы и пр. Незамкнутые экраны чаще всего используются при испытаниях всего комплекса антенных устройств или СВЧ тракта. В зависимости от характера работ, применяются различные формы незамкнутых экранов и материалы для них. Однако чаще всего используются плоские, плосковогнутые или *П*-образные экраны.

Таблица 19.3

Основные размеры образцов сеток и примерная величина ослабления, которую дает сетка на различных волнах [33]

№ пп.	Диаметр проволоки, мм	Число ячеек на см²	Ослабление СВЧ мощности, дБ		
			$\lambda = 3$ см	$\lambda = 10$ см	$\lambda > 10$ см
1	0,07	400	35	45	45
2	0,14	186	23	45	45
3	0,45	25	20	28	40

Из эластичных экранов могут быть изготовлены экранные шторы, специальная одежда для защиты работающих от СВЧ излучений. В качестве материала для эластичных экранов используется специальная ткань, в структуре которой имеется сетка из тонких металлических нитей. Ткань с размером ячеек $0{,}5 \times 0{,}5$ мм на волнах 3 и 10 см обеспечивает ослабление соответственно 25 и 40 дБ. Эластичные экраны изготовляются также из пористой резины, заполненной карбонильным железом, с впрессованной латунной сеткой.

В качестве экранирующего материала для окон помещений, кабин и пр. используется прозрачное стекло с отражающими экранными свойствами. Стекло, покрытое двуокисью свинца, на волнах 0,8 ... ... 150 см создает ослабление порядка 20 дБ.

К индивидуальным средствам защиты относятся защитные очки и специальная защитная одежда. Очки предназначаются для защиты глаз от вредного действия СВЧ, когда интенсивность излучения выше 100 мкВт/см². Серийно выпускаются [33] очки ОРЗ—5 с пленкой двуокиси олова. Они обеспечивают ослабление мощности порядка 30 дБ в диапазоне 1,8 ... 150 см при светопропускании стекла не ниже 74%. Оправа очков выполнена из пористой губчатой резины и оклеена с внешней стороны тканью с экранирующими свойствами.

Защитная одежда выполняется из металлизированной защитной ткани и применяется только при кратковременных работах и интенсивностях облучения выше 1 000 мкВт/см² с обязательным применением защитных очков.

19.5. ВОЗДЕЙСТВИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧЕЛОВЕКА И ЗАЩИТА ОТ НЕГО

Рентгеновское излучение возникает, когда быстродвижущиеся в вакууме электроны резко затормаживаются поставленной на их пути преградой. Такой преградой в электронно-ионных приборах является анод (коллектор). Проходя через вещество анода, электроны тормозятся и при этом испускают фотоны рентгеновского излучения. Мягкое рентгеновское излучение низкой энергии возникает при напряжении до 40 кВ в процессе работы высоковольтных приборов, таких как: клистроны, магнетроны, кенотроны, тиратроны, генераторные и модуляторные лампы.

Длина волны рентгеновских лучей занимает спектр волн 0,25 ... 0,06 нм.

Рентгеновские лучи по своему биологическому действию на организм человека представляет определенную радиационную опасность. Проникая в организм человека, они оказывают воздействие на неорганические соли, углеводы, жиры, аминокислоты и белки, из которых состоят клетки. Изменения внутренней структуры вещества могут привести к нарушению обмена веществ, малокровию, катаракте глаз, лучевой болезни и т. д.

Для количественной оценки рентгеновского излучения используют понятие дозы. За единицу дозы излучения принят рентген (Р). Рентген — это такая доза рентгеновского излучения, при которой в одном кубическом сантиметре воздуха (при $t=0°C$ и нормальном атмосферном давлении) образуется $2{,}08 \cdot 10^9$ пар ионов. Производные рентгена — миллирентген и микрорентген.

Мощностью дозы излучения называют дозу излучения в единицу времени, измеряют мощность дозы в рентгенах в секунду (Р/с), рентгенах в час (Р/неделю).

Таблица 19.4

Предельно допустимые нормы облучения

Категория облучения	Внешнее облучение всего организма	
	мР/неделя	Р/год
А	100	5
Б	10	0,5
В	1	0,05

Санитарными нормами установлены следующие предельно допустимые нормы облучения для трех категорий облучаемых (табл. 19.4):

— категория А — профессиональное облучение лиц, работающих непосредственно с источниками рентгеновских излучений;

— категория Б — облучение лиц, работающих в помещениях, смежных с помещениями, где ведутся работы с источниками рентгеновских излучений, но не занятых непосредственно работой с источником;

— категория В — облучение населения всех возрастных категорий.

При работе с рентгеновским излучением во избежание заболеваний необходим строгий дозиметрический контроль. Он включает в себя измерение индивидуальных доз облучения работающих, контроль интенсивности излучения на рабочем месте, в соседних помещениях, контроль эффективности защитной экранировки установок. Уровень излучений от каждой установки должен проверяться 1 раз в полгода и после каждого нарушения защитной экранировки.

Для индивидуального дозиметрического контроля в настоящее время широко используются миниатюрные дозиметры типа ДК-02, ДК-50 и ДКП-50А, позволяющие измерять суммарную дозу. Используется также комплект индивидуальных дозиметров типа КИД-1. Работающие носят в нагрудных карманах трубки, которые периодически проверяются. С их помощью устанавливается доза облучения, полученная работающим.

Снижение уровня рентгеновского излучения и ликвидация воздействия его на обслуживающий персонал достигается применением общих и индивидуальных средств защиты.

К общим средствам защиты относятся экранирование, которое позволяет снизить облучение до любого заданного уровня. Экраны могут быть стационарные и передвижные. Материал и толщина экрана, выбираются в зависимости от необходимой величины ослабления излучения. К индивидуальным средствам защиты относятся: защитные очки, козырьки из свинцового стекла, просвинцованные резиновые фартуки и перчатки и т. д.

Индивидуальные защитные средства применяются только тогда, когда возникает острая необходимость работы под облучением без защитных экранирующих средств, а в основном они являются дополнительными к общим мерам защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Агаджанов П. А., Горшков Б. М., Смирнов Г. Д.** Основы радиотелеметрии. М., Воениздат, 1971.
2. **Аппаратура** для частотных и временных измерений. Под ред. А. П. Горшкова. М., «Сов. радио», 1971. Авт.: В. А. Благов, А. С. Дембровский, В. Н. Зайцев, А. В. Пантелеев, А. А. Ульянов, Б. Л. Фатеев.
3. **Барсуков Ф. И., Русанов Ю. Б.** Элементы и устройства радиотелеметрических систем. М., «Энергия», 1973.
4. **Белопольский И. И.** Источники питания радиоустройств. М., «Энергия», 1971.
5. **Бортовые** радиолокационные системы. Пер. с англ. Под ред. К. Н. Трофимова. М., Воениздат, 1964.
6. **Валитов Р. А., Сретенский В. Н.** Радиотехнические измерения. М., «Сов. радио», 1970.
7. **Власов Г. Д.** Проектирование систем электроснабжения летательных аппаратов. М., «Машиностроение», 1967.
8. **Григорьянц В. Г.** Технические показатели радиолокационных станций. М., Воениздат, 1963.
9. **Долгов В. А.** Встроенные автоматизированные системы контроля. М., «Энергия», 1967.
10. **Долгов В. А., Келин А. В.** Электронные датчики для автоматических систем контроля. М., «Сов. радио», 1968.
11. **Долин Т. А.** Основы техники безопасности в электрических установках. М., «Энергия», 1970.
12. **Калашников Н. И.** Основы расчета электромагнитной совместимости систем связи через ИСЗ. М., «Связь», 1970.
13. **Кантор А. В.** Аппаратура и методы измерений при испытаниях ракет. М., Оборонгиз, 1963.
14. **Карамов З. С., Фомин А. Ф.** Элементы и узлы аналоговых радиотелеметрических систем. М., «Энергия», 1966.
15. **Клич С. М.** Проектирование СВЧ устройств радиолокационных приемников. М., «Сов. радио», 1973.
16. **Князев А. Д., Пчелкин В. Ф.** Проблемы обеспечения совместной работы радиоэлектронной аппаратуры. М., «Сов. радио», 1971.
17. **Конторов Д. С., Голубев-Новожилов Ю. С.** Введение в радиолокационную системотехнику. М., «Сов. радио», 1972.
18. **Космические** радиотехнические комплексы. Под ред. С. И. Бычкова. М., «Сов. радио», 1967. Авт.: С. И. Бычков, Д. П. Лукьянов, Е. Н. Назимок, П. В. Оленюк, Н. К. Сергеев, В. С. Шебшаевич, Ю. А. Юрков.
19. **Крылов В. А., Юченкова Т. В.** Защита от электромагнитных излучений. М., «Сов. радио», 1972.
20. **Кузьмин А. Д., Соломонович А. Е.** Радиоастрономические методы измерения параметров антенн. М., «Сов. радио», 1964.
21. **Лапицкий Е. Г., Семенов А. М., Сосновкин Л. Н.** Расчет диапазонных радиопередатчиков. М., «Энергия», 1974.
22. **Мирский Г. Я.** Радиоэлектронные измерения. М., «Энергия», 1969.
23. **Основы** радиоуправления. Под ред. В. А. Вейцеля и В. Н. Типугина. М., «Сов. радио», 1973. Авт.: Л. В. Березин, В. А. Вейцель, С. А. Волконский, А. И. Жодзишский, М. И. Жодзишский, В. И. Карандатов, В. Н. Типугин, В. К. Чалов.
24. **Ошер Д. Н., Малинский В. Д., Теплицкий Л. Я.** Регулировка и испытания радиоаппаратуры. М., «Энергия», 1971.
25. **Правила** технической эксплуатации средств внутриобластных и внутрирайонных радиосвязей. М., «Связь», 1969.
26. **Правила** технической эксплуатации электроустановок потребителей и Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. М., Атомиздат, 1973.
27. **Радиоизмерительные приборы.** Каталог—проспект издание 10-ое испр. и доп. М., изд-во НИИЭИР, 1973.
28. **Радиоизмерительные приборы.** Каталог — проспект издание 11-ое испр. и доп. М., Изд-во НИИЭИР, 1974.
29. **Радиолокационная** техника. Т. 1, 2. Пер. с англ. М., «Сов. радио», 1949.
30. **Радиотехнические** системы. Под ред. Ю. М. Казаринова. М., «Сов. радио», 1968. Авт.: Ю. М. Казаринов, Ю. А. Коломенский, Ю. К. Лестов, С. В. Толоконников, В. И. Шломин.
31. **Репнин А. С.** Организация и эксплуатация предприятий радиосвязи и радиовещания. М., Связьиздат, 1953.
32. **Роткевич В., Роткевич П.** Техника измерений при радиоприеме. М., «Связь», 1969.

33. **Санитарные** нормы и правила при работе с источниками электромагнитных полей высоких, ультравысоких и сверхвысоких частот. Главное санитарное управление СССР, 1970.
34. **Сколник М.** Введение в теорию радиолокационных систем. М., «Мир», 1965.
35. **Смогилев К. А., Вознесенский И. В., Филиппов Л. А.** Радиоприемники СВЧ. М., Воениздат, 1967.
36. **Справочник** по основам радиолокационной техники. Под ред. В. В. Дружинина. М., Воениздат, 1967.
37. **Справочник** по радиоэлектронным измерительным приборам. М., «Энергия», 1976. Авт.: Ю. С. Гаврилов, А. С. Еременко, Л. Ю. Зубилевич, А. В. Келин, В. М. Коневских, Б. Н. Лозицкий, И. И. Мельниченко, А. Н. Стельмашенко.
38. **Строительные** нормы и правила, ч. III, разд. А, гл. 10 (СН и ПШ-А 10—70): «Приемка в эксплуатацию законченных строительством предприятий, зданий и сооружений. Основные положения». М., Стройиздат, 1973.
39. **Строительные** нормы и правила, ч. III, разд. Е, гл. 1 (СН и ПШ-Е. 1-62): «Сооружения связи, радиовещания и телевидения. Общие положения организации строительства и приемки в эксплуатацию». М., Стройиздат, 1964.
40. **Строительные** нормы и правила, ч. III, разд. А, гл. 11 (СН и ПШ-А 11—70): «Техника безопасности в строительстве». М., Стройиздат, 1972.
41. **Теория** и практика эксплуатации радиолокационных систем. Под ред. С. М. Латинского. М., «Сов. радио», 1970. Авт.: С. М. Латинский, В. И. Шарапов, С. П. Ксенз, С. С. Афанасьев.
42. **Техника** безопасности и противопожарная техника в электрорадиоэлектронной промышленности. Под ред. И. И. Девяткина. М., «Энергия», 1969. Авт.: С. П. Павлов, И. П. Павлов, Н. А. Сычева, Н. Ф. Спесивцева.
43. **Тихонов В. И.** Статистическая радиотехника. М., «Сов. радио», 1966.
44. **Тузов Г. И.** Выделение и обработка информации в допплеровских системах. М., «Сов. радио», 1967.
45. **Фельдбаум А. А., Бутковский А. Г.** Методы теории автоматического управления. М., «Наука», 1971.
46. **Финкельштейн М. И.** Основы радиолокации. М., «Сов. радио», 1973.
47. **Фрадин А. З., Рыжков Е. В.** Измерение параметров антенно-фидерных устройств. М., «Связь», 1972.
48. **Черепанов В. П., Каневских В. М., Львов В. Н.** Газоразрядные источники шумов. М., «Сов. радио», 1968.
49. **Эксплуатационная** и ремонтная документация. ГОСТ 2.601—68...2.605—68. М., Издательство стандартов, 1969.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОБРАЗЦЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДОКУМЕНТОВ

Таблица П.1.1

Перечень
основных проверок технического состояния изделия

№ пп.	Что проверяется и при помощи какого инструмента, приборов и оборудования. Методика проверки	Технические требования

Таблица П.1.2

Перечень
наиболее часто встречающихся или возможных неисправностей

№ пп.	Наименование неисправности, внешнее проявление и дополнительные признаки	Вероятная причина	Метод устранения	Примечание

Таблица П.1.3

Перечень
специального оборудования, стендов, приборов и инструментов

№ пп.	Наименование	Обозначение	Габаритные размеры, мм	Назначение и краткая техническая характеристика	В какой ЗИП включены	Примечание

Таблица П.1.4

Перечень

стандартизованного оборудования, приборов, стендов и приспособлений

№ пп.	Наименование	Модель, тип и номер стандарта	Краткая характеристика по каталогу	Назначение

Таблица П.1.5

Перечень

работ различных видов технического обслуживания

№ пп.	Содержание работ, методика их проведения	Технические требования	Приборы, инструмент, приспособления и материалы, необходимые для выполнения работы

Таблица П.1.6

Перечень

изделий или их составных частей для периодической проверки органами надзора

№ строки	Наименование	Тип, марка по ГОСТ или обозначение по чертежу	Количество в изделии	Периодичность проверки	Документ, на основании которого проводится проверка	Примечание

Таблица П.1.7

Перечень
приборов и аппаратуры для периодической проверки точности показаний

№ строки	Проверяемые приборы и аппаратура						Документ, на основании которого производится проверка	Проверочные средства				Примечание
	наименование	тип	класс	пределы измерения	количество на одно изделие	периодичность проверки		наименование	тип	класс	пределы измерения	

Таблица П.1.8

Таблица смазки изделия

Наименование и обозначение смазываемого изделия механизма, номера позиций на иллюстрированной схеме смазки	Наименование смазочных материалов и номер стандарта технических условий на них для эксплуатации			Количество точек смазки	Способ нанесения смазочных материалов	Периодичность проверки и замены смазки	Примечание
	при температуре до —40°С	при температуре до —50°С	для длительного хранения				

Таблица П.1.9

Комплект поставки

№ строки	Обозначение	Наименование	Количество	Габаритные размеры	Масса, кг	Заводской номер	Обозначение укладочного или упаковочного места	Примечание

Таблица П.1.10

Сведения о хранении

Дата		Условия хранения	Должность, фамилия и подпись лица, ответственного за хранение
установки на хранение	снятия с хранения		

Таблица П.1.11

Сведения о консервации и расконсервации при эксплуатации изделия

Шифр, индекс или обозначение изделия	Наименование изделия	Заводской номер	Дата консервации	Метод консервации	Дата расконсервации	Наименование или условное обозначение предприятия, организации, производившего консервацию (расконсервацию) изделия	Дата, должность и подпись лица, ответственного за консервацию (расконсервацию)

Таблица П.1.12

Сведения о движении изделия при эксплуатации

№ пп.	Поступил (а)		Должность, фамилия и подпись лица, ответственного за приёмку	Отправлен (а)		Должность, фамилия и подпись лица, ответственного за отправку
	откуда	номер и дата приказа наряда		куда	номер и дата приказа наряда	

Таблица П.1.13

Сведения о закреплении изделия при эксплуатации

№ пп.	Должность	Фамилия лица, ответственного за эксплуатацию	Номер и дата приказа		Подпись ответственного лица
			о назначении	об отчислении	

Таблица П.1.14

Учет работы (учет часов работы)

Дата	Цель включения (запуска) в работу	Источник питания	Время включения (запуска)	Время выключения (остановки)	Продолжительность работы

Таблица П.1.15

Учет часов работы по месяцам и годам

Месяцы	Итоговый учет работы по годам					
	19___г.			19___г.		
	количество часов, циклов, километров	итого с начала эксплуатации	подпись	количество часов, циклов, километров	итого с начала эксплуатации	подпись
Январь Февраль . . . Декабрь						
ИТОГО:						

Таблица П.1.16

Учет неисправностей при эксплуатации

№ пп.	Дата и время отказа (выхода из строя) изделия или его составной части. Режим работы, характер нагрузки	Характер (внешнее проявление) неисправности	Причина неисправности (отказа) количество часов работы отказавшего элемента изделия	Принятые меры по устранению неисправности, расхода ЗИП и отметка о направлении рекламации	Должность, фамилия и подпись лица, ответственного за устранение неисправности	Примечание

Таблица П.1.17

Особые замечания по эксплуатации и аварийным случаям

Дата	Особые замечания по эксплуатации и аварийным случаям	Принятые меры	Должность, фамилия и подпись лица ответственного

Таблица П.1.18

Учет технического обслуживания

Дата	Вид технического обслуживания	Замечания о техническом состоянии	Должность, фамилия и подпись ответственного лица

Таблица П.1.19

Периодический контроль основных технических характеристик при эксплуатации и хранении

№ строки	Проверяемая характеристика			Дата проведения изменения			
	наименование и единица измерения	величина		19___г.		19___г.	
		номинальная	предельного отклонения	фактическая величина	замерил (должность, подпись)	фактическая величина	замерил (должность, подпись)

Таблица П.1.20

Данные о поверке измерительных приборов поверочными органами

№ строки	Наименование прибора	Заводской номер	Предел измерения	Периодичность поверки	Разряд, класс точности, погрешность	19___г.		19___г.	
						дата	подпись поверителя	дата	подпись поверителя

Таблица П.1.21

Результаты технического освидетельствования специальными контрольными органами

Дата освидетельствования	Наименование и обозначение	Результаты освидетельствования	Периодичность освидетельствования	Срок следующего освидетельствования	Должность, фамилия и подпись представителя контрольного органа

Таблица П.1.22

Сведения об изменениях в конструкции изделия и его составных частей во время эксплуатации

№ пп.	Основание (наименование документа)	Дата проведения изменения	Содержание проведенных работ	Характеристика работы изделия после произведенных изменений	Должность, фамилия и подпись лица, ответственного за проведение изменения	Примечание

Таблица П.1.23

Сведения о замене составных частей изделия за время эксплуатации

№ пп.	Снятая часть				Вновь установленная часть		Дата, должность, фамилия и подпись лица, ответственного за проведение замены
	Наименование и обозначение	Заводской номер	Число отработанных часов (циклов)	Причина выхода из строя	Наименование и обозначение	Заводской номер	

Таблица П.1.24

Сведения об установлении категорий

Дата	Основание для установления категории	Установленная категория	Должность, фамилия и подпись ответственного лица	Примечание

Таблица П.1.25

Сведения о ремонте изделия

№ пп.	Наименование и обозначение составной части изделия	Основания для сдачи в ремонт	Дата		Наименование ремонтного органа	Количество часов (циклов, километров, смен) работы до ремонта	Вид ремонта средний, капитальный и др.	Наименование ремонтных работ	Должность, фамилия и подпись ответственного лица	
			поступления в ремонт	выхода из ремонта					производившего ремонт	принявшего из ремонта

Таблица П.1.26

Сведения о результатах проверки инспектирующими и проверяющими органами

Дата	Вид осмотра или проверки	Результат осмотра или проверки	Должность, фамилия и подпись проверяющего	Примечание

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

ОГЛАВЛЕНИЕ

РАЗДЕЛ II

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ, РЕМОНТ И ХРАНЕНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

РАЗДЕЛ III

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УСТРОЙСТВ И ПОДГОТОВКА КОМПЛЕКСА К ПРИМЕНЕНИЮ

Алексей Иванович Александров
Георгий Александрович Бобровник
Александр Степанович Еременко
Николай Михайлович Поляков
Юрий Борисович Русанов

ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Редактор *Н. К. Калинина*
Художественный редактор *А. Н. Алтунин*
Обложка художника *О. В. Камаева*
Технический редактор *А. А. Белоус*
Корректор *Г. М. Денисова*

Сдано в набор 17 IV-1976 г. Подписано в печать 4 VIII-1976 г. Т-12590
Формат 70×100[1]/[16] Бумага типографская № 1
Объем 22,75 усл. п. л., 25,198 уч.-изд. л.
Тираж 9700 экз. Зак. 627 Цена 1 р. 58 к.

Издательство «Советское радио», Москва, Главпочтамт, а/я 693

Московская типография № 10 «Союзполиграфпрома»
при Государственном Комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Э 41 **Эксплуатация радиотехнических комплексов.** М., «Сов. радио», 1976.

280 с. с ил.

На обороте тит. л. авт.: А. И. Александров, Г. А. Бобровник, А. С. Еременко и др.

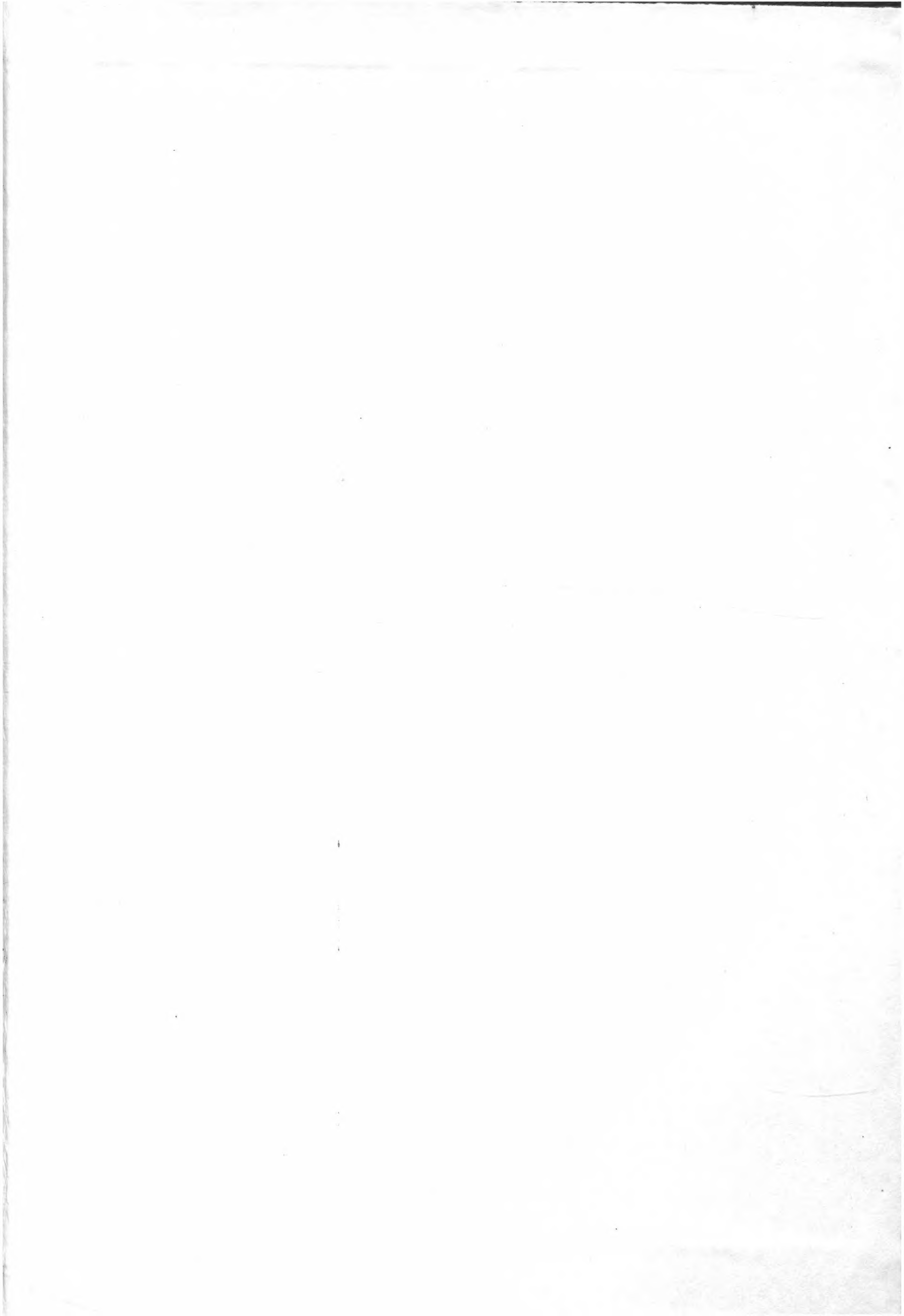
Рассматриваются вопросы теории и практики эксплуатации радиотехнических комплексов, характеристики и критерии оценки состояния радиотехнических систем в различных режимах, методы организации технического обслуживания, ремонта и хранения, способы проверки и оценки технического состояния устройств, систем и комплекса в целом.

Книга рассчитана на инженеров, занимающихся эксплуатацией и проектированием радиотехнических систем, а также на студентов старших курсов радиотехнических факультетов вузов.

Э $\frac{30405\text{-}073}{046(01)\text{-}76}$ 19-76 **6Ф21**







ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ